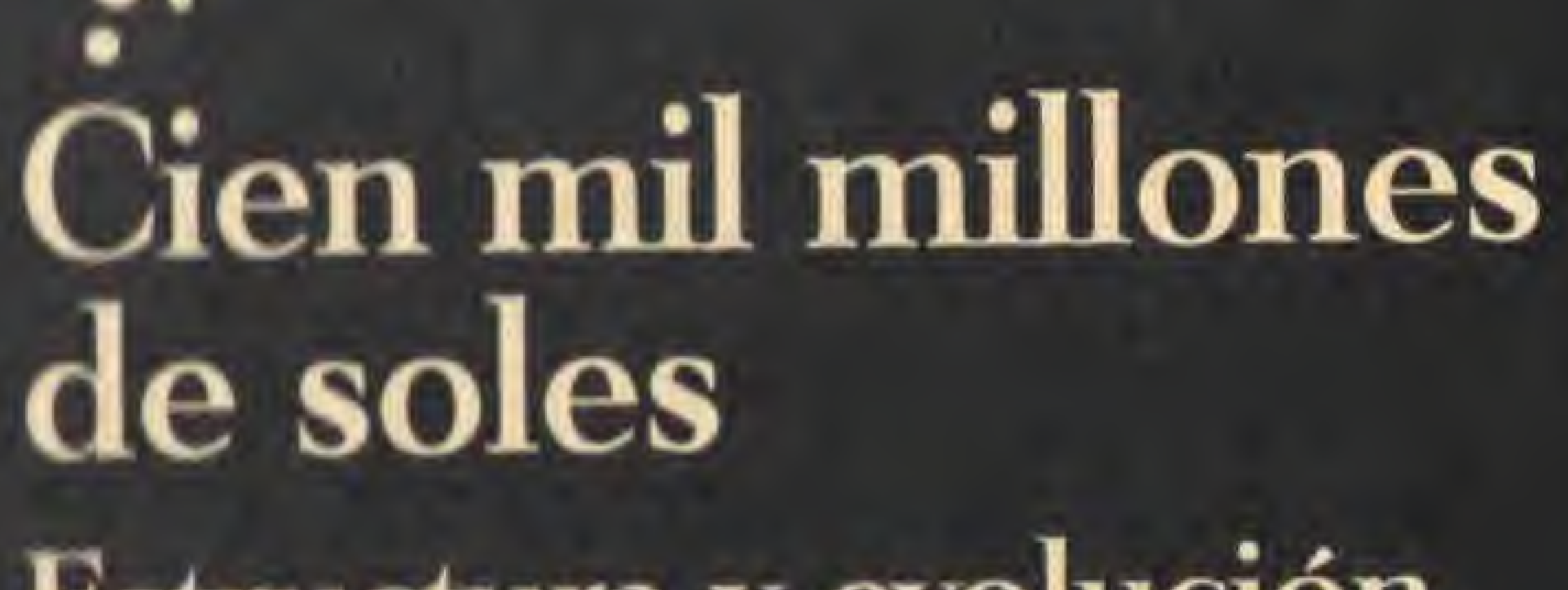
¿Durante cuánto tiempo podremos seguir viviendo a expensas del Sol? ¿De dónde proviene su energía? ¿Cómo se originan las estrellas y cómo acaban? ¿Quién decide la formación de las estrellas? ¿Qué es una supernova? ¿Qué son las estrellas de rayos X? El astrofísico Rudolf Kippenhahn responde en este libro a todas estas preguntas desde su propia experiencia en el campo de la investigación. Además, describe de modo ameno y comprensible todo lo que hoy sabemos sobre el ciclo vital de una estrella, en especial cómo cambian las estrellas al agotarse su energía.

El doctor Rudolf Kippenhahn fue profesor de Astronomía y Astrofísica en la Universidad de Gotinga de 1965 a 1974. En 1975 fue nombrado director del Instituto de Astrofísica de la Max-Planck-Gesellschaft, en Garching (Munich). Es coautor del libro de texto *Elementare Plasmaphysik* (*Física elemental del plasma*) y autor, entre otros, del libro *Licht vom Rande der Welt* (*Luz del confín del Universo*), publicado en la Biblioteca Científica Salvat.







Cien mil millones de soles

Estructura y evolución de las estrellas

Rudolf Kippenhahn

Biblioteca Científica Salvat



Cien mil millones de soles

Biblioteca
Científica
Salvat

Cien mil millones de soles

Estructura y evolución de las estrellas

Rudolf Kippenhahn

SALVAT

Versión española de la obra original alemana *Hundert Milliarden Sonnen*, publicada por R. Piper GmbH & Co. de Munich

Traducción: Manuel Montaner
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8901-X (Volumen 21)
Depósito Legal: B 33638-1993
Publicado por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impreso por Printer, i.g.s.a. Diciembre 1993
Printed in Spain

ÍNDICE

PRÓLOGO

Esta obra se basa en más de cien conferencias pronunciadas con la intención de presentar los descubrimientos de la moderna astrofísica en forma fácilmente comprensible a un público amplio. Tomó su forma definitiva cuando a partir de ellas compuse, en el semestre de invierno 1978-79, un curso para alumnos de todas las facultades de la Universidad de Munich. En ocasiones el texto siguió de cerca los artículos que Alfred Weigert y yo habíamos publicado en la revista "Sterne und Weltraum" explicando los resultados de nuestras investigaciones personales. Introduje en muchos puntos del texto recuerdos personales, porque gran parte de los descubrimientos expuestos en la obra se han realizado en los últimos 25 años. Yo mismo he podido "vivirlos" como astrónomo. En algunos casos mis colaboradores y yo tuvimos la suerte de "estar metidos" en el proceso.

Me han ayudado muchos amigos y colaboradores eliminando del texto faltas y pasajes poco claros. Wolfgang Hillebrandt, John Kirk, Hans Ritter, Joachim Trümper y Werner Tscharnuter han corregido algunos capítulos. Kurt von Sengbusch ha leído y mejorado casi toda la obra. Mi amigo, el matemático de Göttinger, Hans Ludwig de Vries, me ha proporcionado una gran ayuda al leer críticamente todo el manuscrito frase por frase; debo a él muchas sugerencias. La obra no se hubiese escrito sin el constante estímulo de mi esposa. Ursula Hennig y Gisela Wessling transcribieron grandes partes del manuscrito, propusieron numerosas correcciones y demostraron mucha paciencia cuando yo quería inmediatamente corregir sus correcciones. Doy las gracias a todos los que han colaborado.

Rudolf Kippenhahn

INTRODUCCIÓN

La acción se desarrolla en la Vía Láctea. Los protagonistas del drama son los cien mil millones de estrellas que la forman y unos cuantos centenares de astrónomos de la Tierra.

Según el guión impuesto por las leyes de la naturaleza, la materia del Universo tiene la tendencia a concentrarse en cuerpos esféricos, que nosotros llamamos estrellas. Los materiales de su interior están tan calientes que no pueden existir allí ni cuerpos sólidos ni fluidos de ningún tipo. Las estrellas son esferas de gas, que mantienen su forma gracias a su propia gravedad. Llamamos Sol a una de estas esferas. Un observador exterior que lo comparara con las demás estrellas de la Vía Láctea la consideraría una estrella de tamaño medio, no muy grande, no muy pequeña, de brillo también medio: una estrella sin nada que destacar entre cien mil millones más. El Sol es importante únicamente para nosotros, porque nuestra vida depende de él.

La mayoría de estrellas de la Vía Láctea están situadas en un disco plano, más o menos circular, el disco que forma nuestra *Galaxia*, un disco tan grande que la luz necesita casi cien mil años para atravesarlo diagonalmente de un borde al otro. Todas las estrellas se desplazan alrededor del centro del disco siguiendo trayectorias complicadas impuestas por el juego entre la fuerza centrífuga y la gravedad: la Vía Láctea está en rotación. Pero nosotros no estamos solos en el Cosmos con nuestro sistema estelar. La nebulosa de Andrómeda es otro disco en rotación formado por estrellas. En la figura 0-1 (páginas centrales del libro) contemplamos desde fuera este sistema estelar. El disco parece elíptico, porque lo miramos de lado. La nebulosa de Andrómeda es un retrato fiel de nuestro propio sistema estelar. Los tipos de estrellas presentes en nuestra Vía Lác-

tea, todos los procesos que aquí se dan, se repiten también en la galaxia de Andrómeda, y no sólo en ella, puesto que hay miles y millones de galaxias, quizá incluso un número infinito de ellas.

En la figura 0-4 (páginas centrales del libro) contemplamos verticalmente desde arriba otro sistema estelar. Desde 1924 se ha podido demostrar con seguridad que nuestro sistema galáctico y las estructuras nebulosas y a menudo espirales presentes en el cielo son del mismo tipo. Se conocían con mucha anterioridad los pequeños discos nebulosos de débil luminosidad y a menudo elípticos llamados *nebulosas espirales.* En 1755, Immanuel Kant, entonces de 31 años, en su "Historia general de la naturaleza y teoría del cielo" comparó estos discos con nuestro propio sistema estelar: «Si el ojo del observador contempla este Universo de estrellas fijas (Kant se refería a nuestro sistema galáctico) a una distancia tan inmensurable que el observador quede fuera de él, el mundo de estrellas aparecerá con un ángulo tan pequeño como el de una pequeña habitación iluminada con una débil luz, y su figura será circular si su superficie se ofrece normalmente al ojo, y elíptica si se observa desde un lado.» Kant deduce de ello que las nebulosas elípticas que se observan en el cielo son sistemas galácticos situados a gran distancia, y escribe a continuación: «Todo nos hace creer que estas figuras elípticas han de considerarse universos idénticos, es decir, Vías Lácteas de constitución igual a la que acabamos de describir.» Sin embargo, tuvieron que pasar casi 200 años para que se demostrase este hecho.

El Sol, y nosotros con él, está situado aproximadamente en el plano central de nuestro sistema galáctico. Si miramos hacia el espacio en dirección perpendicular al disco, veremos un número relativamente reducido de estrellas, pero si miramos de lado, nuestra mirada tropezará con muchas estrellas, como indica la figura 0-2. El disco plano de nuestro sistema estelar aparece pues como una faja luminosa que atraviesa el cielo nocturno: es el cinturón de la Vía Láctea que nos muestra la figura 0-3.

Pero el disco de nuestro sistema no está lleno únicamente de estrellas. Unas nubes luminosas demuestran que el espacio entre las estrellas no está vacío. Una centésima parte de la masa de nuestra galaxia no se concentra en forma de estrellas sino que llena los espacios existentes entre ellas. Su composición química se parece a la del Sol; sin embargo, su densidad es sólo una billonésima de una billonésima de la densidad solar. Dentro de este gas *interestelar* están incrustados diminutos granitos de polvo. Las nubes de polvo interestelar, actuando como gruesas cortinas, debilitan y enrojecen

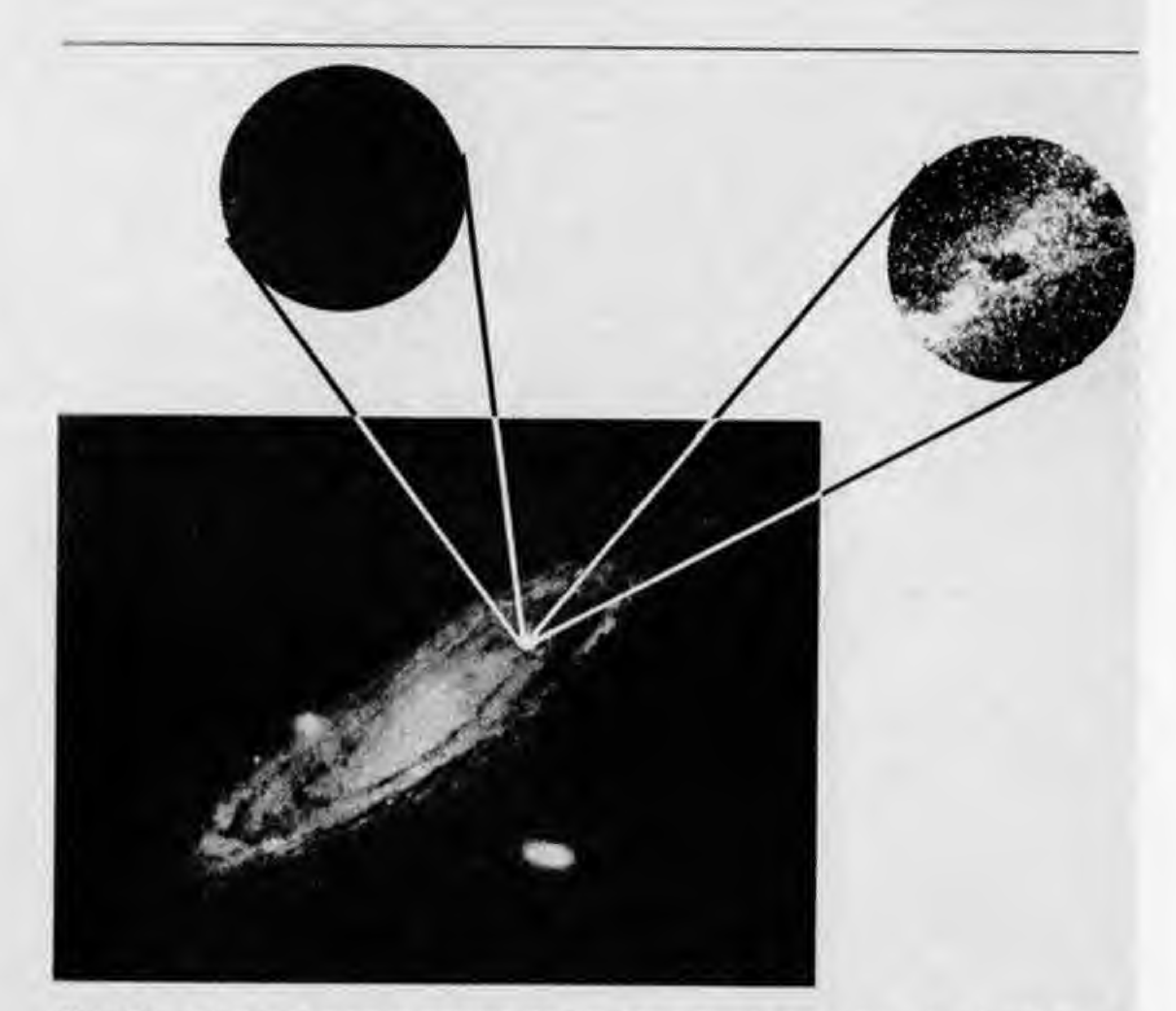


Fig. 0-2. El ejemplo de la galaxia de Andrómeda nos permite entender el origen de la banda luminosa de la Vía Láctea. Si un observador, desde su planeta nativo situado en el disco galáctico, mira hacia fuera del plano del disco verá más o menos la imagen de la izquierda: en su campo de visión aparece un número relativamente reducido de estrellas. Si mira en una dirección que coincida con el plano del disco, verá la multitud de estrellas del disco formando una banda luminosa que cruza el cielo, como muestra la imagen de la parte superior derecha.

la luz de las estrellas situadas detrás suyo, del mismo modo que el Sol en la puesta se vuelve rojo por el polvo que contiene la atmósfera terrestre. Los granos de polvo interestelar son pequeños: su diámetro mide solamente una diezmilésima de milímetro.

Las estrellas, el gas y el polvo de la Vía Láctea se mueven lentamente y en promedio dan una vuelta al punto central cada 100 millones de años. Pero el mundo de las estrellas no es tan indolente. Muchas de ellas forman sistemas dobles y cada componente se



Fig. 0-3. La Vía Láctea fotografiada con una cámara gran angular. Las líneas negras que cruzan la imagen se deben a la misma cámara. (Fotografía: W. Schlosser, Astron. Institut der Ruhr-Universität, Bochum.)

mueve alrededor de la otra en períodos de años, de días o incluso de horas. Otras se hinchan y se encogen de nuevo con un ritmo regular, como si respiraran. De vez en cuando una explosión revienta una estrella, y ésta brilla brevemente casi con tanta intensidad como los cientos de miles de millones de estrellas de todo el sistema

juntas. Algunas estrellas no emiten su luz de modo continuo sino en forma de destellos, que se suceden a intervalos de centésimas de segundo.

Un puñado de astrónomos empeñados en comprender el Universo contempla este impresionante escenario de la naturaleza desde sus observatorios de la Tierra, un diminuto planeta que gira alrededor de una estrella insignificante, el Sol. Los astrónomos, con aparatos construidos con los materiales de su planeta, siguen las evoluciones del Cosmos y envían telescopios y cohetes por encima de la molesta atmósfera de la Tierra. Muchos de sus conciudadanos los confunden con los astrólogos, aunque no tengan nada que ver con ellos. Otros los admiran porque sus pensamientos se mueven en dimensiones que nuestra imaginación, formada en contacto con los fenómenos de la vida diaria, es incapaz de comprender. Su trabajo les acerca un paso más a la creación, por lo menos a la creación del mundo inanimado. Pero esta proximidad es la proximidad propia de los científicos sobrios que no pueden extraer ninguna norma moral de lo que saben. Su trato con lo grande y con lo infinito no les convierte en hombres mejores. Tampoco les empuja únicamente el ansia de saber. Las ganas de hacer carrera y la competencia influyen en sus vidas del mismo modo que influyen en los demás sectores sociales, y algunos grandes descubrimientos se deben a estos motivos. Pero también entre los astrónomos existe el deseo apasionado de saber, la ayuda mutua y la colaboración amistosa. Muchos pasajes de este libro van a demostrarlo. El resultado de la investigación es una obra humana y, por lo tanto, imperfecta en muchos aspectos, a veces incluso errónea. Sin embargo, el camino que sigue la ciencia astronómica, desde sus primeros inicios en los babilonios hasta la moderna astrofísica, es un camino de progreso, a pesar de repetidos retrocesos.

Hemos identificado el escenario del drama, hemos presentado a los protagonistas, la acción puede ya empezar.

I LA LARGA VIDA DE LAS ESTRELLAS

La Tierra se desplaza alrededor del Sol a una velocidad de 30 kilómetros por segundo. Su órbita forma, de modo muy aproximado, un círculo con un diámetro de 300 millones de kilómetros. El globo terráqueo mientras se mueve recibe luz del Sol. La energía que recibe la cara dirigida hacia el Sol, la cara que está de día, es remitida casi en su totalidad al espacio, especialmente después de que la parte calentada haya girado por efecto de la rotación terrestre y se encuentre en la cara opuesta al Sol, la cara nocturna.

Debemos a esta alternancia entre energía recibida y energía emitida que la superficie terrestre se mantenga a una temperatura que hace habitable nuestro planeta. Sin embargo, hay que precisar que no toda la energía solar incidente es reemitida al espacio: una parte de ella se combina químicamente en las plantas. El hombre y los animales viven de la energía solar almacenada en las plantas. Cuando nos calentamos con carbón y con petróleo utilizamos también la energía absorbida por las plantas en períodos anteriores de la historia de la Tierra. También las turbinas de nuestras centrales hidráulicas funcionan gracias a la energía solar, porque los rayos solares evaporan el agua del océano y alimentan los ríos con la lluvia. Cada kilómetro cuadrado de la superficie terrestre dirigida hacia el Sol recibe una irradiación de 1,36 kilovatios. La radiación total recogida por la superficie terrestre equivale a casi 200 billones de kilovatios. Por grande que pueda parecernos esta cantidad, es ínfima en comparación con la energía que el Sol emite cada segundo en todas direcciones. Si queremos expresar en kilovatios la energía radiada por el Sol necesitaremos un número de 24 cifras. El globo terráqueo recibe sólo una mínima parte de este total.

¿DE DÓNDE PROCEDE LA ENERGÍA DEL SOL?

El Sol emite año tras año al espacio una cantidad enorme de luz y de calor, es decir, de energía. ¿Cuánto tiempo hace que dura este proceso y cuánto tiempo durará? ¿Disminuye a lo largo del tiempo la energía que el Sol emite y acabará alguna vez el frío con la vida de la Tierra? ¿O bien aumenta lentamente el brillo del Sol y el final de la vida terrestre será un océano hirviente? Desde que los hombres se han dedicado continuamente a observar el Sol no han podido constatar, ni con los instrumentos más finos, ningún lento cambio en la intensidad de la radiación solar. Los restos de la antigua vida orgánica descubiertos en estratos muy antiguos de la corteza terrestre demuestran que el Sol brilla desde hace tiempo con la misma intensidad que ahora, o sea, con la intensidad suficiente para que la vida pueda mantenerse en la Tierra. En los estratos de Onverwacht, en Transvaal, Suráfrica, se encuentran rastros de organismos unicelulares de desarrollo relativamente elevado y organizado, cuya estructura es ya tan complicada como la de nuestras actuales algas azules: sin lugar a dudas, son los testimonios más primitivos de la vida en la Tierra, unos testimonios de hace 3.500 millones de años. En aquella época el Sol debió tener ya la misma luminosidad que tiene ahora.

El Sol no puede contener una cantidad ilimitada de energía. Es un cuerpo finito, constituido por una cantidad finita de materia, que nosotros podemos determinar porque la masa se manifiesta por su fuerza de atracción. La Tierra, junto con los demás planetas, se mueve alrededor del Sol, y la atracción de la masa solar le obliga a seguir una trayectoria tal que en cada momento la fuerza centrífuga sea igual a la fuerza de atracción. Esto permite calcular la fuerza de atracción del Sol y a partir de ella su masa (ver el Apéndice C). Esta masa expresada en toneladas es un número de 28 cifras. De esta masa solar parte la energía emitida que alimenta nuestra vida. Si referimos la energía emitida por el Sol a un gramo de materia, vemos que cada gramo del Sol ha de emitir por año unos seis julios. Esta cifra no parece de entrada muy alta si recordamos que el calor emitido por un gramo del cuerpo humano es más de mil veces superior. Pero el hombre está obligado a tomar alimentos a intervalos cortos para poder compensar esta pérdida de energía, mientras que la materia solar proporciona por sí misma la energía que necesita desde hace miles de millones de años.

¿De dónde procede la energía que el Sol emite desde hace tanto tiempo y con tanta intensidad? ¿Puede explicarse mediante transformaciones o reacciones de tipo químico? Imaginemos el proceso químico más sencillo capaz de proporcionar energía: la combustión. Si el Sol estuviera compuesto de carbón, la energía procedente de su combustión bastaría únicamente para cubrir la energía emitida durante unos 5.000 años. Sin embargo, el Sol brilla desde hace varios miles de millones de años. Si el horno solar quemara carbón, se habría vaciado desde hace mucho tiempo.

Todos los demás procesos químicos tienen el mismo inconveniente: no suministran o desprenden la suficiente energía para alimentar la fuente del calor solar.

A fines del siglo pasado se intentó repetidamente descubrir la fuente de la energía solar. Puesto que los procesos químicos en el interior del Sol resultaban insuficientes, se planteó la posibilidad de que el Sol se calentara desde fuera. Nuestro sistema solar está lleno de pequeños cuerpos sólidos que se mueven entre los planetas, los llamados *meteoritos*, que nosotros observamos cuando provocan el fenómeno de las *estrellas fugaces*. Son meteoritos que brillan en el cielo cuando entran en la atmósfera terrestre y se calientan hasta la incandescencia. Algunos meteoritos no se vaporizan completamente en las capas de aire; sus restos caen a la Tierra y muchos figuran expuestos en los museos. La masa del Sol con su poderosa fuerza de atracción ha de atraer un número muy elevado de meteoritos dispersos por el sistema solar, y la caída de éstos ha de ser muy precipitada. Al chocar con el Sol la energía cinética ha de transformarse en calor. ¿Satisface el calor que generan estos meteoritos las necesidades de la radiación solar? La materia de un meteorito al caer en el Sol proporcionaría por gramo una energía de unos 190 millones de julios. Sin embargo, cada año debería precipitarse contra el Sol una centésima parte de la masa de la Tierra en forma de meteoritos para cubrir la energía que el Sol emite, y este aumento de materia en el conjunto de la masa solar se notaría porque aumentaría también la fuerza de atracción del Sol, y el movimiento de la Tierra alrededor del Sol se alteraría. La longitud del año tendría que haber disminuido notablemente en los últimos 2.000 años. Sin embargo, las noticias sobre eclipses solares y lunares de la antigüedad permiten asegurar que no se ha producido ningún cambio medible en los movimientos de nuestro sistema planetario, y en consecuencia tuvo que eliminarse la "hipótesis de los meteoritos"· el Sol no se calienta gracias a la caída de los meteoritos.

Tendríamos otra fuente de la energía solar si el Sol pudiese obtener la energía de su propia gravedad. Ya en el siglo pasado planteó esta posibilidad el polifacético físico y médico Hermann von Helmholtz. Si el Sol estuviera aislado y no recibiera del exterior ninguna energía, en el curso del tiempo se iría contrayendo. Su diámetro se reduciría, y cada gramo de materia solar se iría acercando lentamente al centro del Sol, en una caída continuamente retardada. También entonces se liberaría energía como en el caso de la caída de meteoritos, pero ahora la materia solar "caería" dentro de sí misma, en vez de llegarle de fuera como en la hipótesis de los meteoritos. La masa solar y su atracción sobre la Tierra se mantendrían constantes. Pero este proceso alcanzaría a alimentar el brillo del Sol durante sólo diez millones de años, una centésima parte de los miles de millones de años durante los cuales el Sol ha estado brillando. Por lo tanto, tampoco la gravitación propia puede cubrir las necesidades energéticas del Sol.

LA ENERGÍA ATÓMICA DEL SOL Y DE LAS ESTRELLAS

Sabemos actualmente que la energía nuclear es la fuente de energía más productiva que conocemos. Una parte de la energía eléctrica de nuestras casas procede ya de centrales nucleares. En ellas, átomos pesados de uranio se fisionan dando átomos más ligeros. La fisión de los núcleos libera energía. Las centrales nucleares serán todavía más productivas cuando se consiga extraer energía útil fusionando núcleos atómicos ligeros y convirtiéndolos en átomos pesados. Es especialmente eficiente la fusión de los núcleos de hidrógeno.

El Sol, como casi todas las estrellas, está compuesto principalmente de hidrógeno. ¿Tendrá sentido plantearse la posibilidad de que el Sol se alimente de energía mediante la fusión del hidrógeno? Más tarde veremos que con esta hipótesis hemos descubierto la fuente real de la energía solar. En el tercer capítulo trataremos detalladamente los procesos nucleares que tienen lugar en las estrellas. Pero, antes de demostrar que son realmente las reacciones nucleares lo que mantiene el Sol y, por lo tanto, nos mantiene a nosotros vivos, queremos explicar las consecuencias que tiene el hecho de que en el Sol y en las estrellas los átomos de hidrógeno se fusionen continuamente dando átomos de helio y que la energía nuclear liberada cubra las necesidades de radiación de las estrellas.

Cuando los núcleos atómicos de un gramo de hidrógeno se fusionan y se transforman en átomos de helio, este gramo de materia libera 630.000 millones de julios, es decir, una energía 20 millones de veces superior a la obtenida quemando la misma cantidad de carbón. Por lo tanto, la energía nuclear del Sol dura también 20 millones de veces más, y la duración del Sol se sitúa en los 100.000 millones de años. Por fin hemos descubierto una fuente de energía que cubre las necesidades de radiación del Sol durante miles de millones de años: es la energía nuclear que se libera cuando el hidrógeno se transforma en helio. Según nuestros cálculos, la reserva de energía almacenada en el Sol en forma de hidrógeno alcanza para 100.000 millones de años. Estos cálculos son algo optimistas, porque el Sol contiene únicamente un 70 % de hidrógeno y, por lo tanto, tiene menos "combustible" nuclear de lo que en principio habíamos supuesto. Como veremos más tarde, el agotamiento de la energía nuclear de una estrella empieza a notarse cuando ha gastado del 10 al 20 % de su hidrógeno. Llegamos así a un período de vida de unos 7.000 millones de años, lo bastante largo sin embargo para que el Sol haya podido irradiar de modo uniforme la Tierra durante todo el tiempo en que ha existido vida sobre este planeta.

El Sol es una estrella semejante a las 7.000 estrellas más que pueden verse en el cielo a simple vista, y al número mucho más elevado de estrellas fijas que podemos ver con el telescopio. Estas estrellas también están formadas principalmente por hidrógeno, con unas pocas excepciones. Si la energía que emiten procede también de la fusión del hidrógeno en helio, puede calcularse igualmente el tiempo que durará su reserva de energía nuclear. En el caso del Sol este tiempo es de 7.000 millones de años. Pero se conocen también otras estrellas que agotan su hidrógeno mucho antes. Tomemos por ejemplo el caso de *Spica*, la estrella más brillante de la constelación de Virgo. Podemos determinar su masa porque a su alrededor gira una estrella acompañante (ver el Apéndice C). Spica contiene una cantidad de materia diez veces superior a la del Sol. Sabemos también que radía con una intensidad diez mil veces superior a la de nuestro Sol. Dispone pues, gracias a su mayor masa, de diez veces más combustible nuclear, pero emite tanta energía que su reserva de hidrógeno le bastará únicamente para una milésima parte del tiempo de combustión del Sol. Por lo tanto, la estrella Spica no podrá brillar más que unos cuantos millones de años. Este período de tiempo es muy breve para un proceso cósmico. Recordemos que

hace un millón de años en la Tierra había ya mamíferos superiores, y que el pitecántropo ya caminaba por las selvas de Java*.

LAS ESTRELLAS ENVEJECEN

La reserva de energía de que disponen el Sol y otras estrellas es grande, pero se agota con el tiempo. Las estrellas tienen que envejecer. ¿Somos nosotros testigos presenciales de la historia estelar? ¿Podemos observar en el cielo el agotamiento de la reserva de energía de una estrella a lo largo del tiempo y su posterior extinción? Como ya hemos visto con el ejemplo del Sol y de Spica, los cambios cósmicos son lentos comparados con la vida del hombre. De hecho las características de las estrellas visibles a simple vista se mantienen siempre iguales, como había observado ya el astrónomo griego Hiparco 150 años antes del nacimiento de Cristo. El intervalo transcurrido desde la emergencia de la inteligencia científica en nuestro planeta es tan corto, que el hombre no ha podido todavía seguir directamente los procesos temporales de la evolución estelar. Algunas estrellas presentan oscilaciones en su brillo. Pero se trata de fluctuaciones que nada tienen que ver con los efectos evolutivos. Podrían compararse con el parpadeo de una vela que no está relacionado inmediatamente con el agotamiento de la reserva de energía contenida en la cera, ni por lo tanto con la extinción de la llama. No se ha podido todavía observar directamente ningún efecto de envejecimiento en las estrellas. Pero si esperáramos un intervalo de tiempo suficientemente largo, este envejecimiento debería hacerse perceptible.

Si el astrónomo quiere descubrir las leyes del desarrollo temporal de las estrellas, ha de actuar como lo haría una efímera que pretendiera comprobar, en el transcurso de su corta vida, el envejecimiento del hombre. Situémonos en su posición: si la efímera estudia a una sola persona durante toda su vida, es decir, de la mañana al anochecer, no podrá constatar en ella ningún cambio debido al envejecimiento. El hombre envejece con mucha mayor lentitud que una efímera. La efímera podrá observar muchas clases de personas. Hay personas de sexo femenino y de sexo masculino, altas y bajas, de piel clara y de piel oscura y la efímera no sabrá si está observando tipos distintos de personas o edades distintas de un mismo tipo de persona. Durante su vida la efímera capta únicamente una imagen instantánea de la humanidad e ignora si las personas bajas continúan siempre siendo bajas o si las personas de piel clara se convierten luego en personas de piel oscura y las de sexo masculino en personas de sexo femenino. Nosotros nos encontramos en la misma situación cuando observamos las estrellas. Captamos una imagen instantánea de las estrellas, y vemos un gran número de tipos distintos. Hay por ejemplo una estrella notable que gira alrededor de Sirio.

* He utilizado a menudo en mis conferencias el ejemplo del pitecántropo, el hombre mono de Java. En una ocasión se me acercó después de una conferencia un periodista de un conocido diario alemán y me dijo que quería escribir un artículo sobre la conferencia, pero que debía incluir fotografías como exigía el nombre de su periódico; me preguntó dónde podía encontrar un dibujo del hombre mono de Java. Le contesté que yo en realidad sólo había hablado de estrellas y que el pitecántropo era un simple ejemplo. Su artículo daría una falsa impresión del tema si sólo incluía un dibujo del hombre mono de Java. «Entiendo» dijo él, y tras pensar un momento agregó: «Podríamos publicar también una foto de usted.»

LA COMPAÑERA DE SIRIO

Sirio es la estrella más brillante de cielo nocturno. En el año 1844 el director del Observatorio de Königsberg, Friedrich Wilhelm Bessel, observó que Sirio efectuaba en el cielo un movimiento periódico, regular, pero muy pequeño (fig. 1-1). Bessel dedujo que Sirio debía tener una estrella acompañante y que ambas giraban alrededor del centro común de gravedad con un período de unos 50 años. Esta hipótesis fue acogida con escepticismo, porque la segunda estrella no podía verse. En el año 1862, Alvan George Clark, un famoso constructor de telescopios de Cambridgeport, en Norteamérica, estaba poniendo a prueba el sistema óptico de un telescopio refractor que había fabricado para un observatorio de Chicago. Cuando apuntó el telescopio hacia Sirio descubrió en la inmediata proximidad de la brillante estrella una estrellita débil y apenas perceptible: la compañera de Sirio imaginada por Bessel.

Hoy sabemos más cosas sobre ambas estrellas. Cada 49,9 años dan una vuelta alrededor de su común centro de gravedad. El estudio del movimiento de este sistema doble nos da información sobre cada una de las estrellas unidas gravitatoriamente entre sí. La estrella principal, llamada Sirio A, tiene una masa 2,3 veces superior a la del Sol. La segunda estrella, Sirio B, durante tanto tiempo ignorada, contiene menos masa, aproximadamente la misma que el Sol. Las

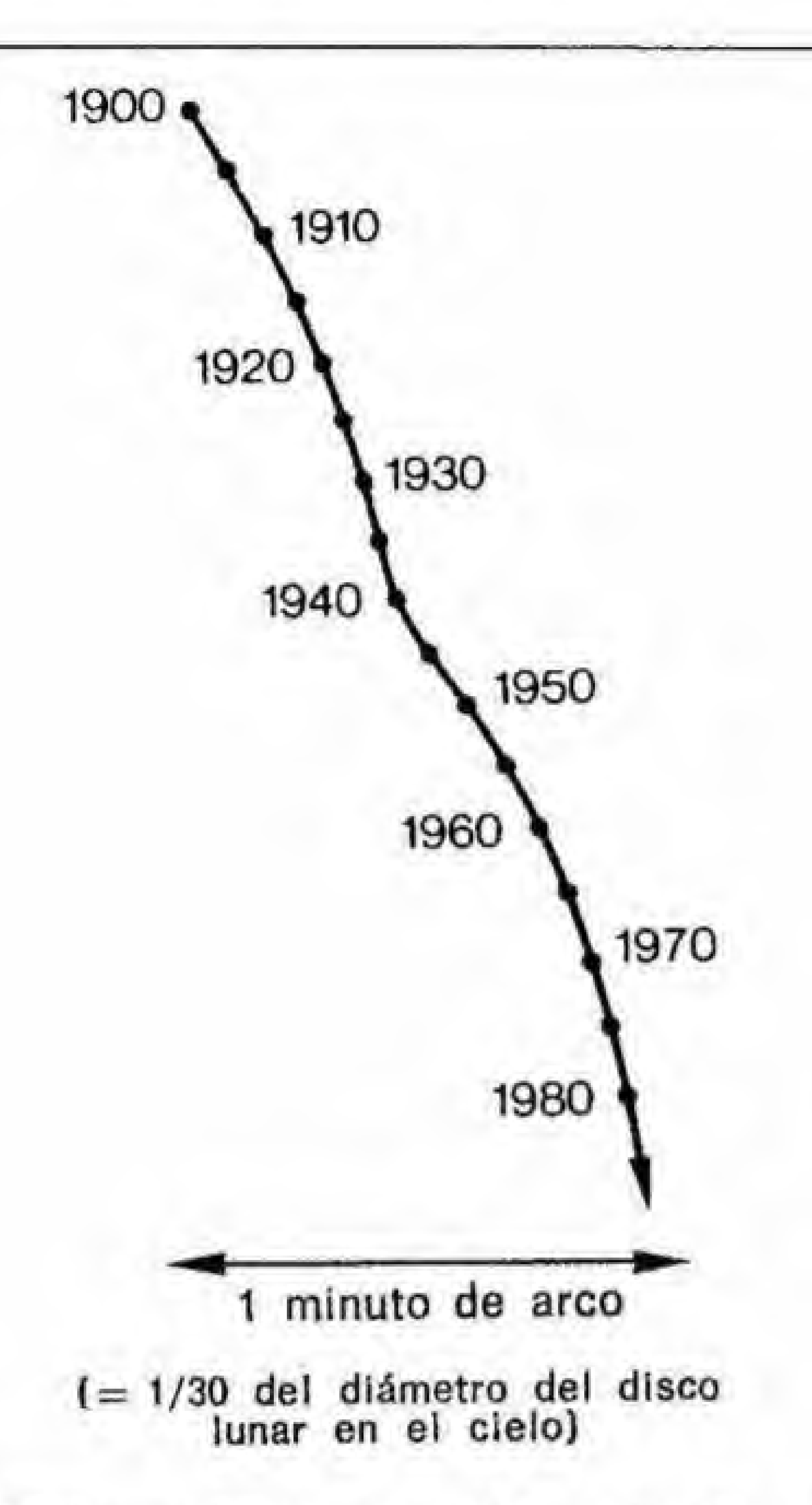


Fig. 1-1. Situación de Sirio en el firmamento durante el período 1900-1985. Sirio, como todas las llamadas estrellas fijas, se desplaza lentamente en el cielo. La dirección de este movimiento en el dibujo es de arriba a la izquierda a abajo a la derecha. El movimiento se debe a que la estrella sigue en nuestra galaxia una trayectoria algo diferente de la del Sol. En este movimiento uniforme se producen a intervalos regulares de 50 años perturbaciones como la representada en la figura y que tuvo lugar hacia el año 1940. Tanto el movimiento uniforme como la perturbación constituyen cambios mínimos en la posición de la estrella, como puede deducirse de la escala dibujada al pie. El movimiento sólo puede comprobarse con instrumentos de medición precisos. Las perturbaciones de repetición regular se deben a una estrella acompañante de baja luminosidad que se desplaza alrededor de la estrella principal y se le acerca de modo especial cada 50 años, perturbando entonces su trayectoria uniforme.

dos estrellas son totalmente distintas. Sirio A es el doble de grande que el Sol; un centímetro cúbico contiene en promedio un cuarto de gramo de materia, es decir, algo menos que un centímetro cúbico de materia solar, que contiene aproximadamente un gramo. Muy diferente es el caso de Sirio B. Su radio es sólo una centésima del radio solar, y puesto que contiene la misma masa que el Sol, la

materia de su interior ha de estar un millón de veces más comprimida que la del Sol. Seguramente cada centímetro cúbico contiene 1.000 kilos de materia. O sea, que en el sistema de Sirio tenemos unidas dos estrellas totalmente distintas. Conocemos muchas estrellas del tipo de Sirio B, que también existen en solitario. En general tienen una temperatura superficial elevada y emiten luz blanca. Debido a su reducido diámetro reciben el nombre de *enanas blancas.*

LA SUPERGIGANTE DEL COCHERO

Las enanas blancas son estrellas en las que la materia está un millón de veces más comprimida que en el Sol. Sin embargo, también conocemos estrellas cuya materia es mucho menos densa que la del Sol. Vamos a estudiar ahora otro par estelar: un sistema como el de Sirio, pero con una estrella interesante de densidad muy baja.

Siempre es una suerte para los astrónomos encontrar dos estrellas obligadas a girar una alrededor de la otra. Su movimiento permite deducir la cantidad de materia que genera el campo gravitatorio común. El caso es especialmente favorable si los dos astros se mueven de modo tal, vistos desde nuestro sistema solar, que de vez en cuando pasan uno detrás del otro ocultándose mutuamente. Hay muchos sistemas estelares dobles que presentan este efecto de ocultación. Las dos estrellas componentes están en estos casos tan juntas que su luz se funde en un punto luminoso común, incluso en los mejores telescopios, dando una luminosidad que es la suma de la radiación de cada estrella. Cuando una estrella al desplazarse se sitúa delante de la otra, la tapa, y nosotros, mientras dura la ocultación, recibimos menos luz. La luz que nos llega del punto común parece debilitada, hasta que la estrella de delante, siguiendo en su movimiento, deja libre otra vez a la estrella de detrás. Estos pares estelares se llaman *variables de ocultación,* porque su brillo cambia a lo largo del tiempo.

La naturaleza de la estrella puede deducirse a partir de los cambios de luminosidad, su descenso hasta el mínimo y su posterior subida, y a partir de la diferencia entre una ocultación y la siguiente, cuando se invierten los papeles de estrella ocultante y estrella ocultada. Señalo todo esto, porque en los años treinta una variable de ocultación permitió investigar un tipo especial de estrella, la *supergigante,* con una precisión superior a la que hubiese podido imaginarse nunca. Se trata de una estrella de la constelación del Cochero:

zeta Aurigae. Los astrónomos sabían desde hacía tiempo que esta estrella era doble; y no porque la hubiesen visto doble en el telescopio, como Sirio. Una investigación detallada de su luz hizo pensar que procedía de dos estrellas, una más caliente y otra más fría. Se dedujo, por lo tanto, que se trataba de una estrella doble y se supuso también que el sistema era de ocultación.

En el invierno de 1931-32, Heribert Schneller, astrónomo de Babelsberger, y Josef Hopmann, de Leipzig, observaron la estrella con ayuda de *fotómetros*, es decir, de aparatos para la medición precisa del brillo de las estrellas, y descubrieron una ocultación real. En un intervalo de 24 horas la luz disminuía en un 65 % (figura 1-2). Luego la estrella permanecía durante 37 días debilitada al mismo nivel para volver luego a la normalidad en otro intervalo de 24 horas. El proceso se repetía cada 972 días.

El estudio del fenómeno en las sucesivas ocultaciones proporcionó una gran cantidad de información sobre el sistema. He aquí los principales resultados: la estrella caliente zeta Aurigae B tiene una temperatura superficial de unos 11.000 grados, o sea, aproximadamente tres veces la del Sol; contiene unas diez masas solares. La estrella zeta Aurigae A, más fría, tiene una temperatura superficial de sólo 3.400 grados. En cambio, la temperatura superficial del Sol es de 5.800 grados*. Zeta Aurigae A contiene una cantidad de materia estelar 22 veces superior a la del Sol, y su radio —esto es lo sorprendente— es 200 veces superior al del Sol. Esta estrella es pues una gigante, que podría contener cómodamente en su interior no sólo el Sol, sino la órbita entera que nosotros recorremos anualmente con la Tierra alrededor del Sol. El mínimo de brillo observado se produce cuando la estrella más caliente desaparece detrás de la gigante fría permaneciendo oculta tras ella durante 37 días (figura 1-3). En cambio, cuando pasa por delante de la estrella más fría sólo oculta una pequeña fracción de su disco. La superficie ocultada de la estrella grande no contribuye gran cosa al total de luz que nos envía el sistema, y por ello la segunda ocultación resulta imperceptible.

En el sistema de zeta Aurigae hemos conocido de cerca a dos

* Aquí y en el resto del libro, si no se indica lo contrario, utilizamos la escala *absoluta* de temperaturas de los físicos, cuyo cero se sitúa a —273 grados centígrados. Puede pasarse de la temperatura absoluta a la escala centígrada o de Celsio restando 273 grados. La superficie solar tiene por lo tanto una temperatura de unos 5.530 grados centígrados.

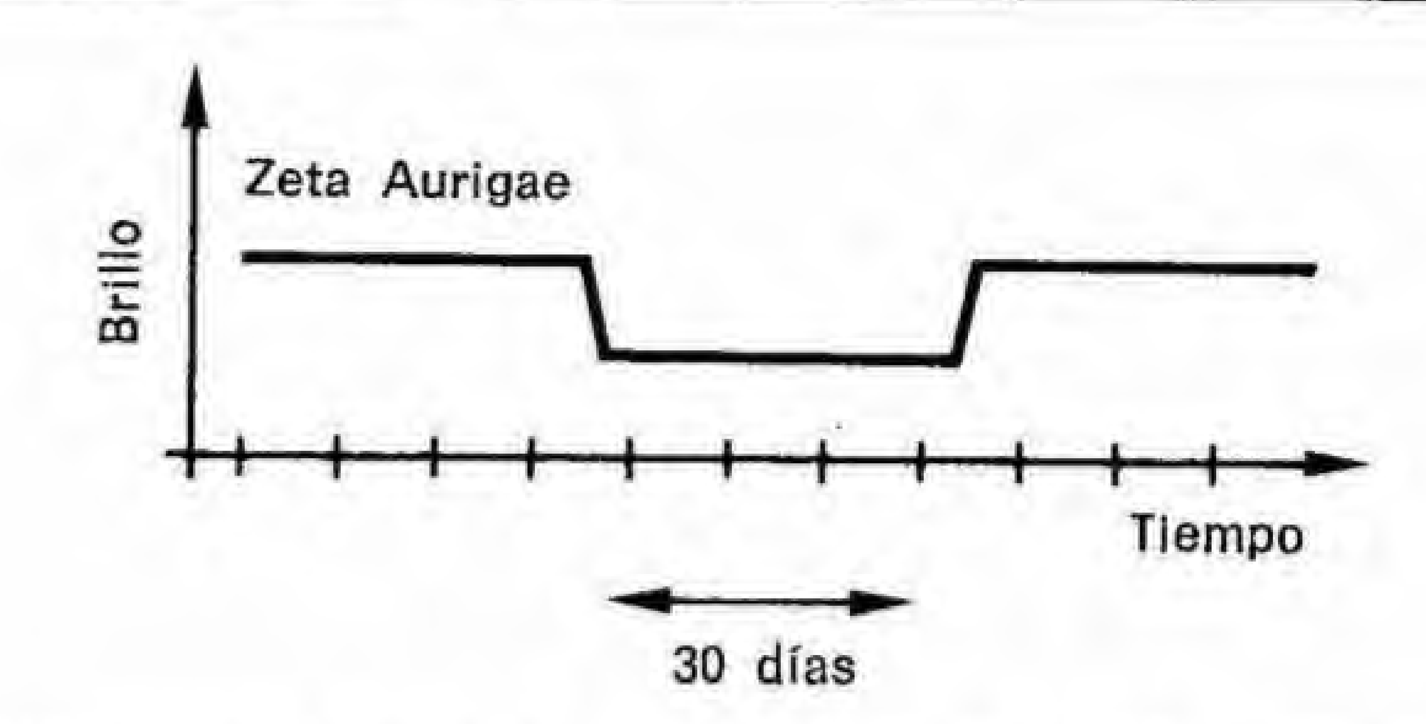


Fig. 1-2. Curva de luminosidad de la estrella zeta Aurigae. La luminosidad disminuye un 65 % en el intervalo de un día. Luego, la estrella permanece debilitada 37 días para volver de nuevo a su luminosidad en el curso de un día. Pasados 972 días se repite el mismo proceso.

estrellas. La estrella caliente no se diferencia mucho del Sol ni de Sirio A. Desde luego tiene más masa, y su diámetro es mayor, pero su densidad media, la cantidad de materia contenida en un centímetro cúbico, es relativamente próxima al valor solar: un tercio de gramo de materia por centímetro cúbico. Muy distinto es el caso de la

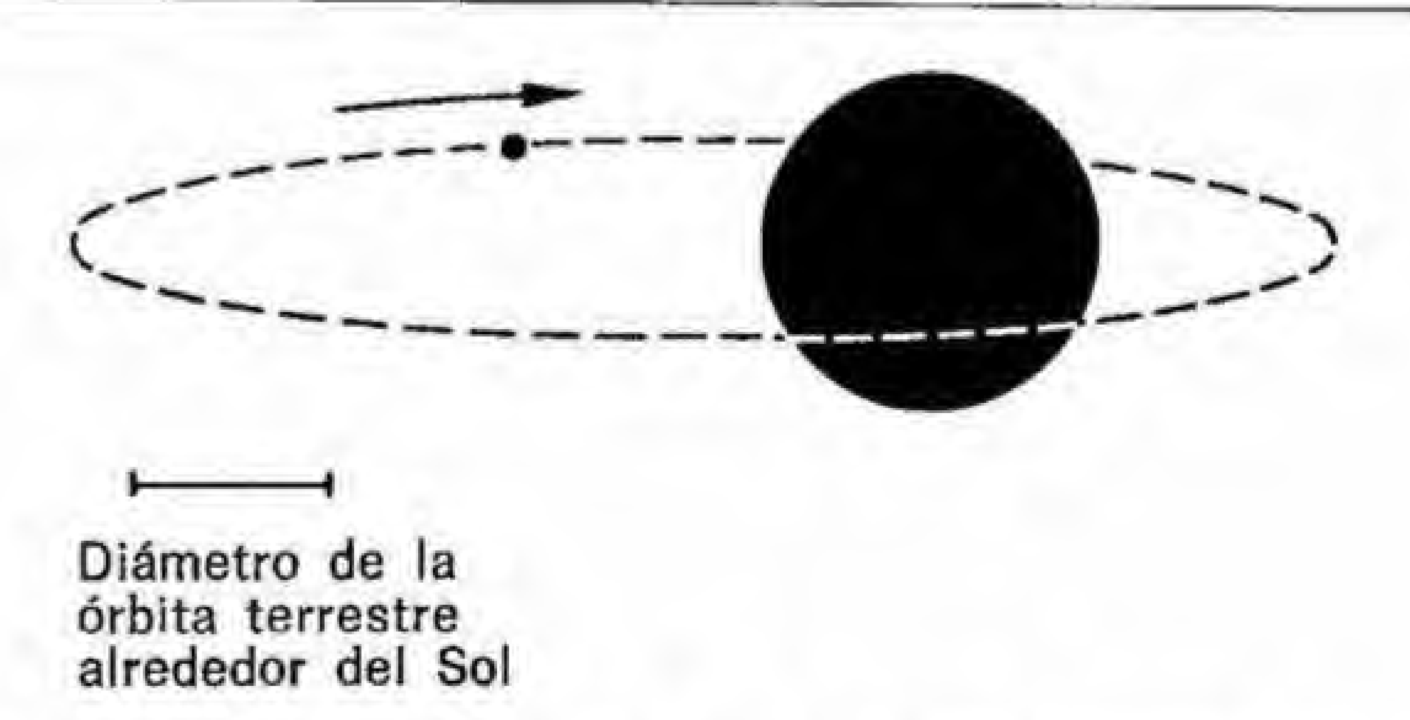


Fig. 1-3. El sistema estelar doble de zeta Aurigae, tal como se vería desde la Tierra si pudiera observarse con telescopios de suficiente aumento. En realidad, las estrellas no se observan por separado y su luz se funde en un único punto luminoso. Cuando la estrella pequeña, que contribuye a más de la mitad de la luminosidad conjunta, se oculta durante 37 días detrás de la estrella mayor, sólo nos llega luz de esta última. La luminosidad conjunta del sistema que entonces observamos es inferior (véase fig. 1-2). La estrella pequeña da una vuelta alrededor de la mayor en 972 días.

estrella fría. Un centímetro cúbico suyo sólo contiene en promedio tres millonésimas de gramo. Las estrellas de este tipo se llaman *supergigantes*.

Hemos conocido pues tres tipos de estrellas esencialmente diferentes:

Estrellas normales —de momento las llamaremos así— como el Sol, como Sirio A y como la componente caliente de zeta Aurigae. Son estrellas de densidad media situada entre unas décimas de gramo y unos cuantos gramos por centímetro cúbico.

Conocemos además las *enanas blancas*, con densidades medias extraordinariamente elevadas de 1.000 kilogramos por centímetro cúbico.

Hemos visto finalmente que hay *estrellas gigantes* con densidades de una millonésima de gramo por centímetro cúbico.

Las estrellas de estos tres tipos aparecen incluso en los mayores telescopios como diminutos puntos de luz de aspecto semejante que sólo se diferencian por su color y su luminosidad, pero basta un estudio superficial de estos objetos para imaginar la multiplicidad de formas que presenta el Universo de las estrellas. Para comprender esta multiplicidad debemos poner orden en el conjunto de 100.000 millones de estrellas que sumadas al Sol llenan nuestra galaxia.

II. EL DIAGRAMA MÁS IMPORTANTE DEL ASTROFÍSICO

Hemos visto en el capítulo anterior hasta qué punto son distintas las estrellas. Hay estrellas de gran masa y color azul claro y estrellas de poca masa y color rojizo. Hay estrellas grandes y rojas, gigantes rojas y supergigantes, y pequeñas estrellas blancas, las enanas blancas; y nosotros somos las efímeras que queremos imponer un orden temporal en esta multiplicidad.

Sin embargo, el hombre ha conseguido resolver este problema y ha explicado por los menos en sus rasgos esenciales la ley de la evolución estelar. Vamos a ver cómo lo ha conseguido.

En primer lugar, hay que poner un orden en la multiplicidad de estrellas. Debemos clasificar según criterios medibles todas las estrellas accesibles a la observación.

MEDICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRELLAS

La magnitud más sencilla que se nos presenta es la *temperatura superficial* de las estrellas. Puede determinarse con relativa facilidad, porque su valor se refleja ya en los colores. Generalmente, quien contempla el cielo estrellado no es consciente de que las estrellas tienen colores distintos. Para poder determinar los colores de las estrellas hay que comparar fotografías del cielo tomadas con distintos filtros de color. Las estrellas azules son calientes y las rojas relativamente frías. De todos modos el color sólo proporciona una indicación aproximada de la temperatura; el estudio del espectro estelar nos da datos más precisos. En principio, sin embargo, puede determinarse directamente la temperatura de las superficies brillantes de todas las estrellas del cielo cuyo brillo lo permita. Tomemos por

ejemplo Sirio A, la estrella principal del sistema de Sirio. Su temperatura superficial es de unos 9.500 grados, y figura así entre las estrellas más calientes. En la zona de la nebulosa de Orión se encuentran estrellas cuyas temperaturas superficiales llegan a los 20.000 grados. En cambio Betelgeuse, la estrella más brillante de Orión, tiene un color rojizo que puede apreciarse a simple vista. Por lo tanto, es una estrella fría; la temperatura en su superficie es de 3.000 grados. Recordemos que la temperatura superficial del Sol se sitúa en los 5.800 grados.

Otra magnitud importante de una estrella es su luminosidad, o sea, la energía que emite por segundo al espacio. La luminosidad no puede determinarse directamente por la observación. Podemos medir el brillo con que aparece la estrella en el cielo, pero este brillo no nos permite deducir la energía que emite la estrella al espacio. Estrellas de igual luminosidad pueden presentar distintos brillos en el cielo si la distancia que nos separa de ellas es distinta. Hay que conocer primero la distancia a una estrella para poder calcular, a partir de su brillo aparente en el cielo, la energía que emite realmente al espacio. En el Apéndice B explicamos de modo resumido cómo determina el astrónomo las distancias de las estrellas. Conocemos pues la luminosidad de las estrellas cuya distancia puede medirse. El Sol nos parece la estrella fija más brillante del cielo, pero su luminosidad comparada con la de otras estrellas es muy moderada. Las estrellas de gran luminosidad brillan 100.000 veces más que el Sol. Sin embargo, la gran distancia que nos separa de ellas nos las presenta como puntitos luminosos apenas perceptibles. Hay también estrellas de poca potencia cuya luminosidad es una cienmilmilésima de la del Sol.

Conocemos pues dos características importantes y medibles de las estrellas: su temperatura superficial y su luminosidad. Se plantea ahora una pregunta: ¿Existen en el Universo todas las combinaciones imaginables de estas dos magnitudes? También podemos preguntarnos: ¿Existen estrellas muy luminosas y calientes y otras también muy luminosas pero frías? ¿Puede existir una luminosidad baja tanto entre las estrellas calientes como entre las frías?

EL DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG Y RUSSELL

El astrónomo discute esta cuestión dibujando un diagrama donde representa la temperatura superficial y la luminosidad. Este

diagrama nos ha ayudado extraordinariamente a desentrañar la ley del desarrollo estelar; vamos pues a estudiarlo. Se llama *diagrama de Hertzsprung-Russell* en honor de sus descubridores, el astrónomo danés Ejnar Hertzsprung y el americano Henry Norris Russell. Para abreviar lo llamaremos sencillamente *diagrama HR*, como los astrónomos. En este diagrama la luminosidad de una estrella se representa creciendo hacia arriba y la temperatura de derecha a izquierda (véase fig. 2-1). Si a partir del color de una estrella determinamos su temperatura, tendremos una de las dos magnitudes importantes del diagrama HR. Si además conocemos la distancia de la estrella, podemos calcular su luminosidad a partir del brillo que presenta en el cielo. Tenemos así las dos magnitudes necesarias para dibujar el diagrama HR, y podemos dibujar en él un punto que representará la estrella. En la figura 2-1 hemos repetido el proceso para varias estrellas que ya nos son conocidas. La escala de temperaturas del eje horizontal no es uniforme, pero esto se debe a motivos técnicos en los cuales no vamos a entrar. Las luminosidades están indicadas en el borde de la izquierda. La cifra 1.000 significa que a esta altura están representadas las estrellas cuya luminosidad es 1.000 veces la del Sol. El Sol tiene, pues, una luminosidad igual a uno, y siendo su temperatura superficial de 5.800 grados, el punto representativo estará situado en el centro del diagrama. Las estrellas cuya luminosidad es superior a la del Sol están situadas encima suyo. Las estrellas que emiten menos energía, como Sirio B la enana blanca del sistema de Sirio, están situadas debajo del Sol. Las estrellas más calientes que el Sol, como Sirio A, zeta Aurigae B —la estrella caliente del sistema zeta Aurigae— y Spica, están situadas a la izquierda del Sol. Las estrellas más frías, como Betelgeuse y la supergigante del sistema zeta Aurigae, están situadas a la derecha.

Los puntos del diagrama HR nos dicen ya algo sobre las características de las estrellas. Las estrellas frías emiten luz rojiza, en cambio las estrellas calientes, luz blanca o azul; por lo tanto, a la derecha del diagrama tendremos estrellas rojas, a la izquierda, blancas o azules. Arriba hay estrellas de gran luminosidad, debajo estrellas de débil luminosidad. Pero un centímetro cuadrado de la superficie de un cuerpo frío emite poca energía por segundo, y si la estrella en su conjunto emite mucho, en su superficie deben caber muchos centímetros cuadrados y la estrella ha de ser grande. Por lo tanto, en la parte superior derecha del diagrama HR tenemos estrellas grandes; se denominan *Gigantes rojas* y *Supergigantes rojas*. Esto confirma lo que ya sabemos en un caso particular: la estrella principal del

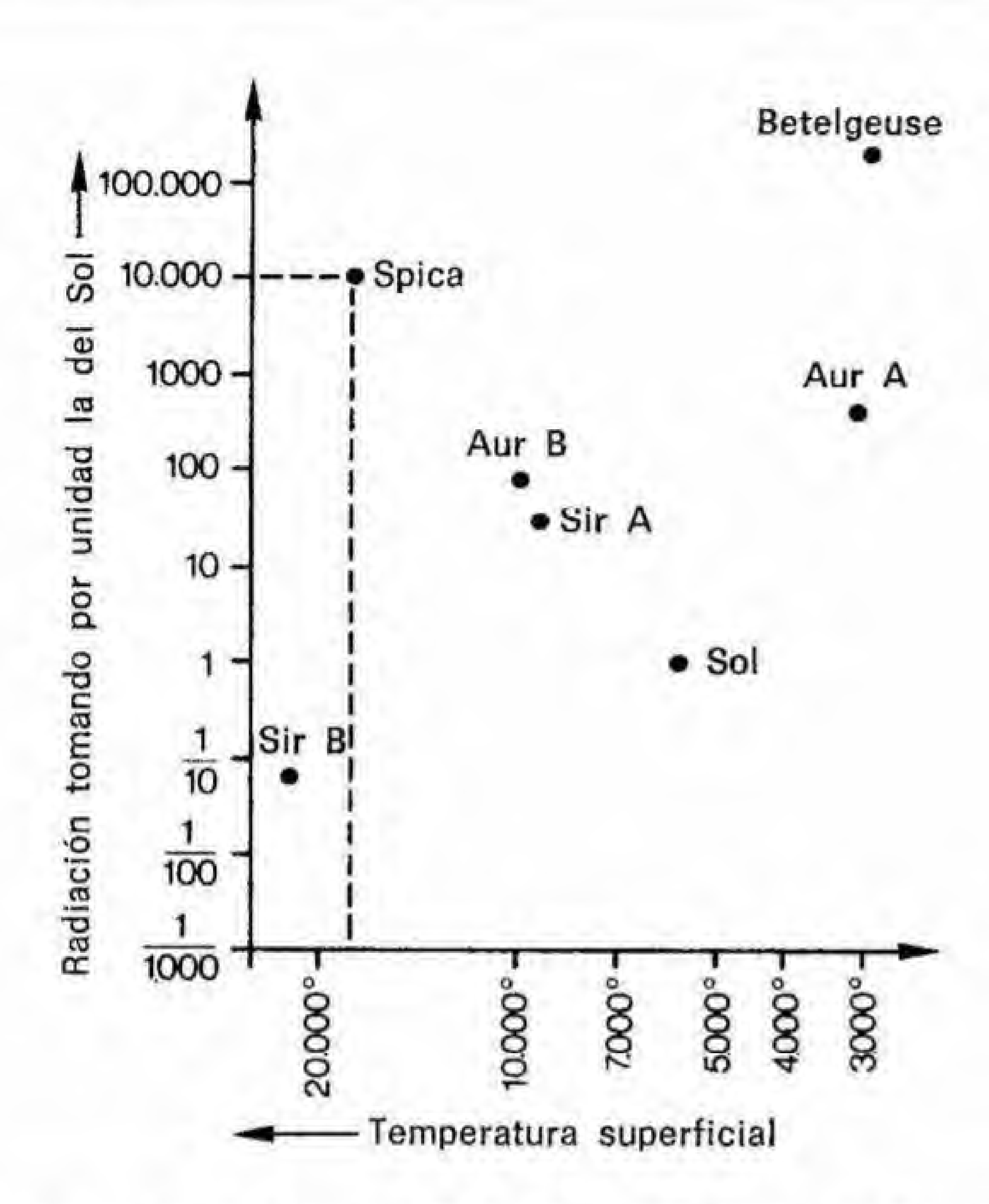


Fig. 2-1. Diagrama de Hertzsprung-Russell con algunas estrellas que ya conocemos. Cuando se conoce la temperatura superficial de una estrella se parte de la temperatura correspondiente en la escala horizontal y se sube hacia arriba. Si se conoce también la luminosidad, se parte del valor correspondiente en la escala vertical de radiación y se tira hacia la derecha. La estrella está representada en el punto de intersección de ambas rectas. Dos rectas de trazos que corresponden a la estrella Spica (temperatura superficial, 18.000°; luminosidad, 10.000 luminosidades solares) indican cómo se representa una estrella en el diagrama. Las componentes del sistema estelar doble descrito en el texto están indicadas por las abreviaturas Sir y Aur.

sistema de zeta Aurigae es tan grande que cabría en ella la órbita de la Tierra. Podemos abordar de modo parecido la parte inferior izquierda del diagrama. Tenemos allí estrellas calientes de poca luminosidad. Un centímetro cuadrado de la superficie de un cuerpo caliente emite por segundo mucha energía, y si las estrellas emiten muy poco podemos deducir que son pequeñas. En la parte inferior izquierda están las enanas blancas. Sirio B es una de ellas.

En general, el tamaño de una estrella puede determinarse a partir de su luminosidad y de su temperatura superficial. La temperatura nos permite saber cuánta energía emite un centímetro cuadrado de superficie. La energía total emitida nos permite calcular el tamaño de la superficie radiante, y por tanto el radio de la estrella.

Una observación más antes de utilizar el diagrama HR para responder a nuestro interrogante sobre el desarrollo temporal de las estrellas: La radiación que nos llega de una estrella es difícil de medir. La atmósfera terrestre no deja pasar toda la radiación. La luz de corta longitud de onda, por ejemplo la radiación ultravioleta, no llega hasta nosotros. Pero incluso la radiación que alcanza el fondo de la atmósfera terrestre cuesta de medir. El ojo humano sólo percibe una parte de la radiación emitida por el Sol y las estrellas; tampoco las placas fotográficas lo captan todo. El ojo y la emulsión fotográfica registran con intensidad variable los distintos colores de la luz. Por ello, en general, cuando se da la luminosidad de una estrella hay que contentarse con la radiación que el ojo humano puede percibir. En la medición se utilizan instrumentos que con la ayuda de filtros explotan la sensibilidad del ojo humano a los colores. A menudo en el diagrama HR en lugar de la luminosidad real se representa únicamente la *luminosidad "visible"* para el ojo, que se denomina también luminosidad visual*. La deformación que esto impone al diagrama HR carece de importancia. En los diagramas de esta obra se utiliza la luminosidad visual (radiación en el dominio visible), cuando se incluyen en ellos datos observados. Sin embargo, cuando los datos proceden de cálculos por computador que luego describiremos, hemos tomado siempre la luminosidad real. En todos los diagramas se indica claramente qué tipo de luminosidad utilizamos.

LAS ESTRELLAS VECINAS DEL SOL

Sabemos ya todo lo necesario para empezar a trabajar con el diagrama HR. Comencemos con las estrellas situadas en la vecindad del Sol. Nos referimos con ello a estrellas tan "próximas" que la

* La distinción entre luminosidad total y luminosidad visual no es un exceso de refinamiento, como se comprueba recordando que una estrella de diez masas solares, por ejemplo Spica, emite en total diez mil veces más que el Sol; en cambio, en el intervalo de la radiación visible sólo le supera mil veces.

luz no tarda más de 70 años en llegar a nosotros. Esta distancia es realmente corta, porque la luz de las estrellas más lejanas de nuestro sistema galáctico tarda unos 70.000 años en llegar hasta el telescopio reflector de los astrónomos. Recibimos de las galaxias más lejanas del Universo luz y ondas de radio que fueron enviadas hace varios miles de millones de años, es decir, en una época en la que el Universo era todavía muy joven. En cambio, las estrellas que ahora queremos tratar están muy cerca de nosotros. De todos modos, la distancia que nos separa de ellas es mucho mayor que la del Sol. La luz para llegar del Sol a la Tierra precisa sólo de unos 8 minutos. La siguiente estrella fija más próxima a nosotros está en el cielo austral, es *Proxima Centauri*. Su luz tarda 4,5 años en llegar a la Tierra.

Las estrellas cercanas son importantes porque podemos determinar su distancia con relativa precisión (ver el Apéndice B), y de este modo a partir de su brillo aparente en el cielo podemos calcular su luminosidad. Nos referimos ahora a la luminosidad visible, medida por lo tanto con un fotómetro con un filtro de color para la radiación visible. La temperatura superficial se deduce a partir de una medición adicional de brillo con otro filtro de color, generalmente un filtro azul. El color y con él la temperatura superficial de la estrella puede determinarse a partir del brillo de la estrella en luz azul y del brillo en el dominio visible, situado más hacia el rojo. Cada estrella cuya temperatura superficial y cuya luminosidad visible se han determinado de este modo da un punto en el diagrama HR. La figura 2-2 muestra el resultado correspondiente a las estrellas próximas al Sol. Vemos inmediatamente que el diagrama no está lleno uniformemente de puntos. Los puntos de la mayoría de estrellas están situados en una banda que va de la parte superior izquierda, es decir, de las estrellas azules y muy luminosas, a la parte inferior derecha, la de las estrellas débiles y rojas. Algunas estrellas están en la parte superior derecha, en el dominio de las gigantes rojas. Debajo a la izquierda hay tres enanas blancas.

El 90 % de todas las estrellas están situadas en esta banda, que los astrónomos llaman *secuencia principal*. Una comparación con la figura 2-1 demuestra que el Sol, Sirio y Spica están situadas también en la secuencia principal, y que están fuera de ella la estrella fría del sistema de zeta Aurigae, Betelgeuse y la compañera de Sirio. Los astrofísicos llaman estrellas de la secuencia principal a las estrellas cuyos puntos representativos están situados en la secuencia principal. En las vecindades del Sol están en cierto modo las estrellas normales, mientras que las gigantes y las enanas son excepciones.

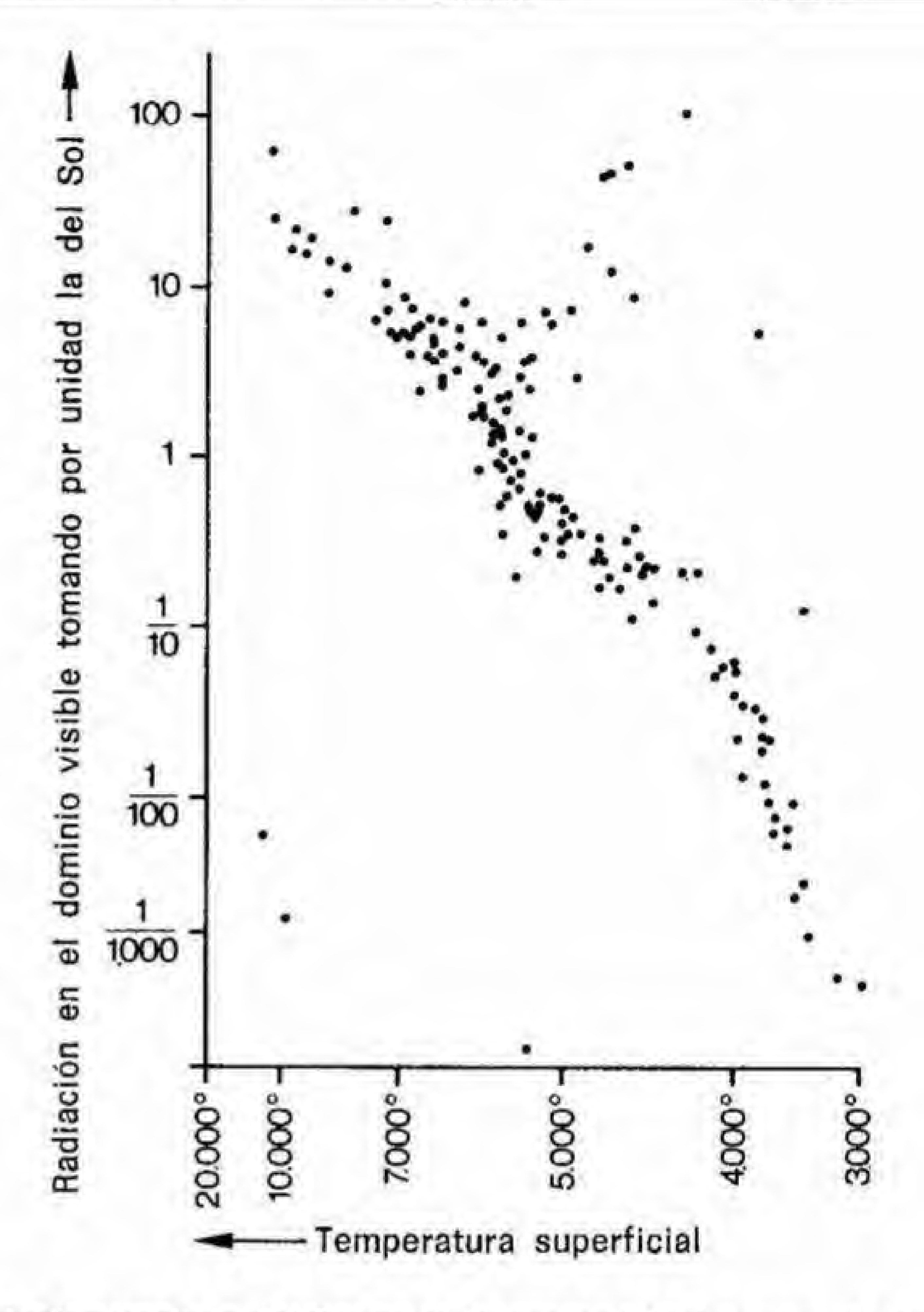


Fig. 2-2. Estrellas vecinas del Sol en el diagrama HR. La mayoría de estas estrellas tienen temperaturas superficiales y luminosidades tales que sus puntos representativos caen sobre una banda del diagrama que va de la parte superior izquierda a la parte inferior derecha. Esta banda se llama *secuencia principal*. Algunas estrellas situadas arriba a la derecha son gigantes rojas, otras situadas abajo a la izquierda son enanas blancas.

Las estrellas de la secuencia principal presentan otra característica importante, que depende de su masa. Sólo en pocos casos podemos saber cuánta materia contiene una estrella. La masa de una estrella sólo puede determinarse con cierta seguridad cuando se mueven estrellas acompañantes en su campo gravitatorio. Hemos dicho ya que los movimientos de los planetas nos permiten calcular la masa del Sol. El movimiento de la compañera de Sirio nos permi-

te saber que en Sirio A se acumula materia equivalente a unas 2,3 masas solares, y que la materia de su compañera equivale aproximadamente a una masa solar. De este modo se ha podido determinar la masa de un cierto número de estrellas (en el Apéndice C hemos esbozado el principio en que se basa este método). Las estrellas de gran masa contienen de 30 a 50 veces más materia que el Sol. Las estrellas fijas de poca masa tienen sólo una décima parte de la masa solar.

Cuando pudo determinarse con ayuda de estrellas acompañantes la masa de algunas estrellas de la secuencia principal, se obtuvo un resultado sorprendente: En cada punto de la serie principal sólo hay estrellas de una masa determinada (fig. 2-3). Las estrellas de la secuencia principal de poca masa están situadas en su extremo inferior, las de gran masa en su extremo superior. Si avanzamos por la secuencia principal de abajo arriba, las masas irán creciendo lentamente. La luminosidad del diagrama HR también aumenta de abajo arriba, por lo tanto podemos afirmar: cuanto más luminosa es una estrella de la secuencia principal, mayor es su masa. Si al comparar dos estrellas de la secuencia principal vemos que una de ellas tiene una luminosidad mayor que la otra, podemos afirmar que esta estrella tiene también más masa que la otra. En la figura 2-4 podemos llegar incluso a deducir la masa directamente de la luminosidad, si sabemos que la estrella pertenece a la secuencia principal. El astrónomo llama a esta regularidad *relación masa-luminosi-*

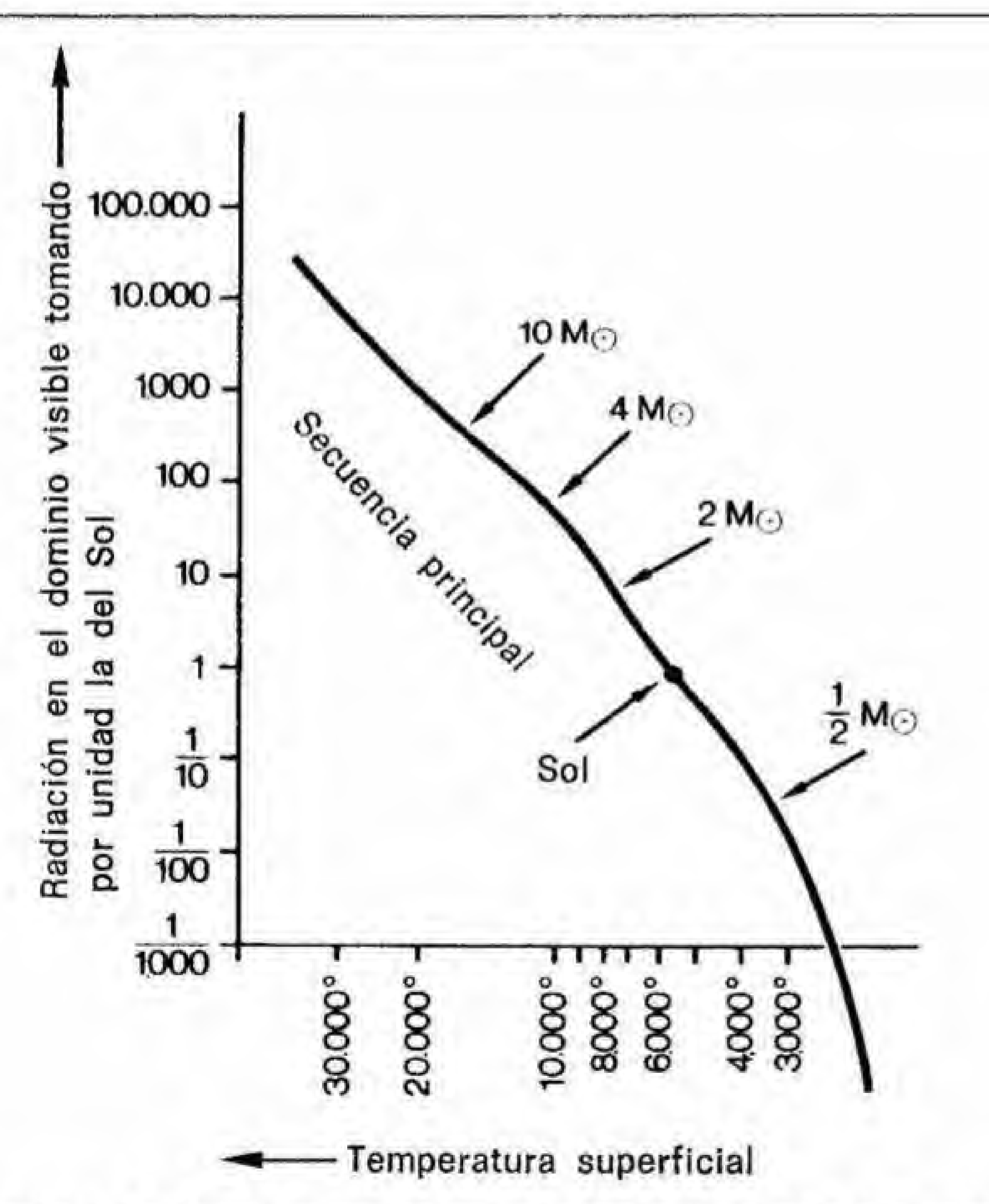


Fig. 2-3. Diagrama HR con la secuencia principal (indicada esquemáticamente con la línea curva). En cada punto de la secuencia principal sólo hay estrellas de una masa determinada. (El astrónomo utiliza a menudo la masa del Sol como unidad de masa, y la respuesta por M☉.)

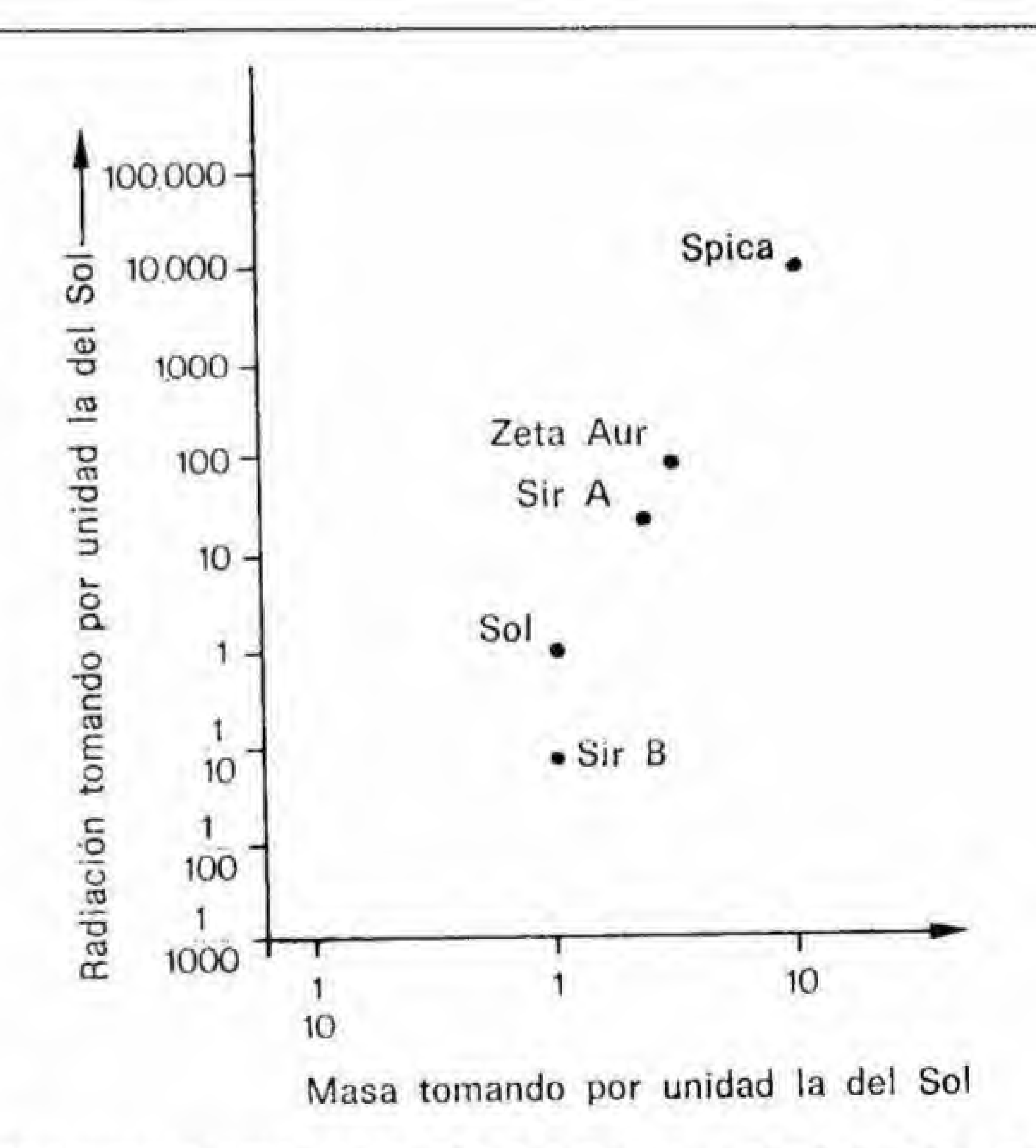


Fig. 2-4. Si representamos en un diagrama la luminosidad creciendo hacia arriba y la masa estelar creciendo hacia la derecha, las estrellas de la secuencia principal quedan situadas sobre una estrecha banda: cuanto mayor es la masa de una estrella, mayor es su luminosidad. Esta es la *relación masa-luminosidad.* Pero sólo es válida para estrellas de la secuencia principal. La acompañante de Sirio, Sirio B, incluida en el diagrama emite menos energía que una estrella de la secuencia principal de igual masa. Sirio B no cumple la relación.

dad. En concreto cumplen esta relación las estrellas de la secuencia principal que ya conocemos: el Sol, Sirio A y Spica. En cambio la enana blanca Sirio B no la cumple, porque no pertenece a la secuencia principal.

Hemos ordenado pues las estrellas próximas al Sol accesibles a la observación y hemos descubierto dos regularidades: en el diagrama HR aparece una *secuencia principal*, y para las estrellas de la secuencia principal es válida la *relación masa-luminosidad.*

¿Qué tiene esto que ver con la ley de la evolución estelar? De nuevo nos asalta la imagen de la efímera. Nosotros observamos estrellas de distintas características, del mismo modo que la efímera ve personas de distintas características. La secuencia principal nos ha proporcionado una ordenación de estas características exteriores, pero todavía no sabemos cómo interpretarla. Nos sentimos como la efímera que ha ordenado a las personas de acuerdo con una señal exterior, quizá el tamaño de las orejas, y que, sin embargo, no ha conseguido saber nada sobre el desarrollo en el tiempo de las personas.

Nosotros, que conocemos muy bien el desarrollo de las personas, podríamos dar una pista a la efímera. Podríamos decirle por ejemplo que las clases de una escuela están compuestas por personas de igual edad. La efímera sabiendo esto podría comprobar inmediatamente que el sexo y el color de la tez no son consecuencia del desarrollo, o sea, que las personas de sexo distinto y las personas de distinto color de la piel no pertenecen a edades distintas de un solo y único individuo. Sin embargo, las efímeras descubrirían que la estatura está estrechamente relacionada con la edad. El astrónomo puede aprovechar la afortunada circunstancia de que en el cielo existen "clases escolares" de estrellas, es decir, grupos de estrellas que tienen la misma edad.

LOS CÚMULOS ESTELARES: "CLASES ESCOLARES" DE ESTRELLAS

En ocasiones las estrellas manifiestan una especie de instinto gregario. Forman en el cielo grupos, cúmulos de estrellas. Algunos cúmulos se conocen desde la antigüedad. Así, los poetas griegos y romanos citan a las *Pléyades* (fig. 2-5; véanse páginas centrales del libro). A simple vista pueden verse las seis estrellas más brillantes del grupo, pero en realidad pertenecen a él una gran cantidad de estrellas más débiles, con seguridad 120 estrellas. Probablemente el cúmulo contiene varios centenares de estrellas. Las estrellas de las Pléyades se encuentran todas dentro de un dominio espacial relativamente reducido. La luz tarda 30 años en ir de un extremo del cúmulo al otro. Recordemos que una esfera de 30 años luz de diámetro centrada en el Sol sólo contiene unas 20 estrellas, o sea que las Pléyades constituyen una auténtica acumulación de estrellas. Las Pléyades no sólo se concentran en un punto del espacio, sino que se desplazan con igual velocidad en la misma dirección. El hecho de que ocupen el mismo lugar y de que manifiesten el mismo



Fig. 2-6. Cúmulo globular 47 Tucanae, fotografiado con el telescopio reflector Schmidt de 1 m del Observatorio Austral Europeo (ESO) en Chile. Las estrellas están tan apretadas que la fotografía no llega a resolver en estrellas individuales la zona central. Parece como si las estrellas del centro estén casi tocándose, pero en realidad su separación continúa siendo grande.

movimiento permite deducir que las estrellas de las Pléyades tienen una historia evolutiva común: nacieron al mismo tiempo.

Lo mismo es válido para otros cúmulos estelares, por ejemplo las *Híades*, que también son conocidas desde la antigüedad. El origen común de las estrellas aparece con mayor claridad en los llamados *cúmulos estelares globulares*, que cuentan con un número de estrellas comprendido entre los 50.000 y los 50 millones (fig. 2-6). En las regiones centrales de estos cúmulos las estrellas a menudo presentan una densidad 10.000 veces superior a la que existe en la vecindad del Sol. ¡Qué fantástico espectáculo ofrecerá el cielo estre-

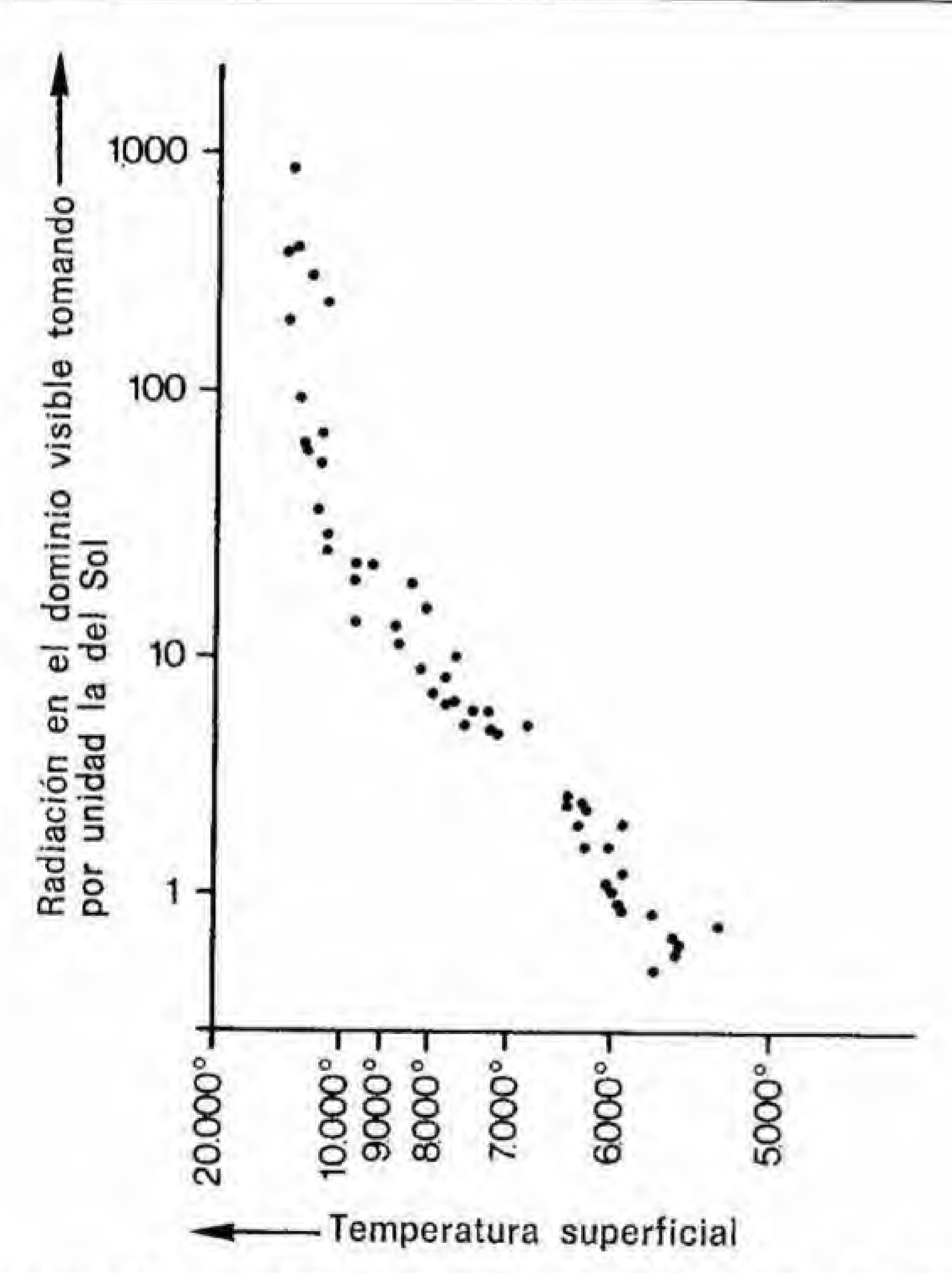


Fig. 2-7. Diagrama HR del cúmulo estelar de las Pléyades. Sólo están representadas las estrellas más brillantes. El diagrama muestra una secuencia principal muy marcada. Pero hacia arriba, cuando la luminosidad visual es más de mil veces la del Sol, las estrellas del diagrama se desvían algo hacia la derecha de la secuencia principal.

llado a un observador situado en el sistema planetario de un Sol perteneciente a un cúmulo estelar!

¿Qué distribución presentan las luminosidades y las temperaturas superficiales de las estrellas de un cúmulo estelar? ¿Se parece a la de las estrellas vecinas del Sol, como muestra la figura 2-2? ¿Pertenecen también la mayoría de estrellas de un cúmulo a la secuencia principal? Si se estudia el diagrama HR de estas estrellas se observa una diferencia esencial. Hay ciertamente algunos cúmulos estelares, cuyas estrellas pertenecen todas a la secuencia principal, como muestra el diagrama HR de las Pléyades (fig. 2-7). Sin em-

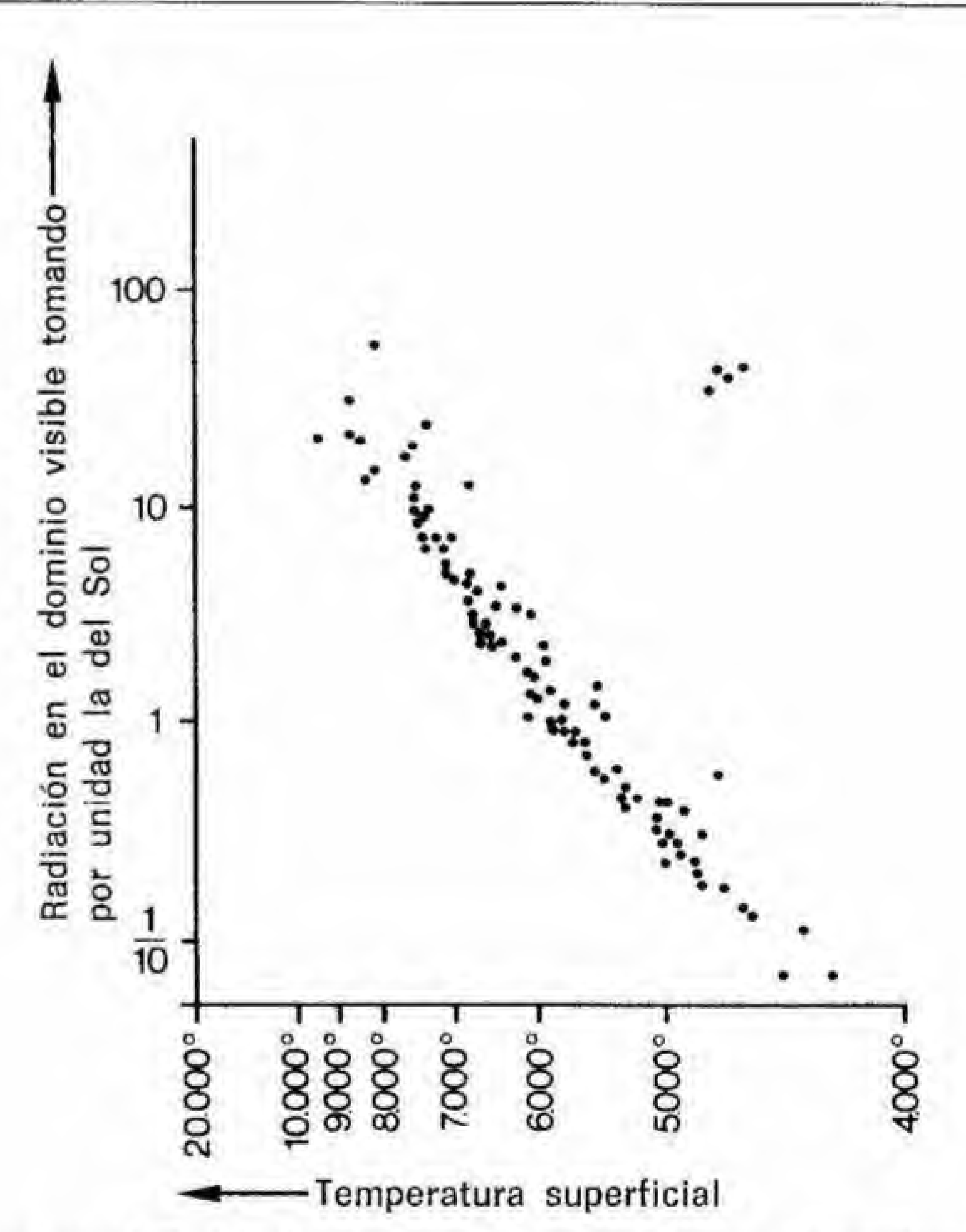


Fig. 2-8. Diagrama HR del cúmulo estelar de las Híades. En las Pléyades (véase fig. 2-7) la radiación de las estrellas de la secuencia principal alcanzaba un valor mil veces superior al del Sol; en cambio, la secuencia principal de las Híades se acaba ya por debajo de cien veces la radiación solar. Faltan las estrellas más brillantes de la secuencia principal. En cambio, en el diagrama HR de este cúmulo estelar aparece un grupo de gigantes rojas.

bargo, en la mayoría de cúmulos estelares sólo presentan propiedades típicas de las estrellas de la secuencia principal las estrellas más débiles, es decir, las de menor luminosidad; pero en su caso no se observa la banda completa de la secuencia principal. La secuencia se interrumpe al subir hacia las luminosidades altas. Faltan, pues, las estrellas más brillantes de la secuencia principal. En su lugar los cúmulos estelares contienen también estrellas rojas de gran luminosidad: gigantes y supergigantes rojas, como comprobamos en el diagrama HR de las Híades en la figura 2-8. Más claro es el diagrama HR de los cúmulos estelares globulares en la figura 2-9. Sólo está ocupado el sector inferior de la secuencia principal, mientras que

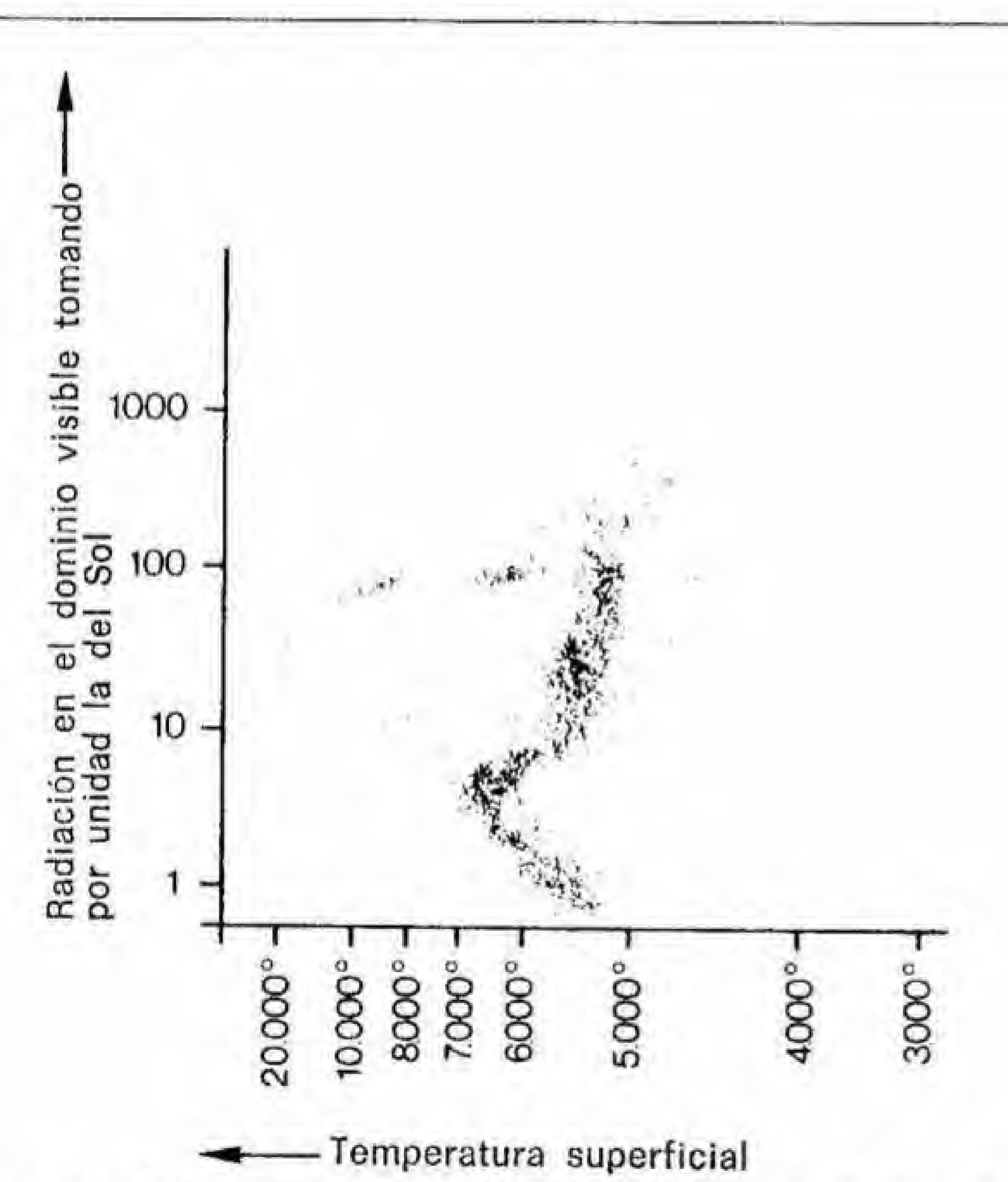


Fig. 2-9. Diagrama HR del cúmulo estelar M3. Es un cúmulo globular como el de la fotografía de la figura 2-6. Sólo quedan en la secuencia principal estrellas cuya radiación es cinco veces la del Sol. La mayoría de estrellas más brillantes no pertenecen a la secuencia principal. En otras secciones de esta obra veremos la importancia que tienen, entre otras, las estrellas cuya radiación visible es cien veces superior a la del Sol y que ocupan una banda horizontal que se extiende de los 5.800 grados a los 13.000 grados. Forman la llamada rama *horizontal*.

los puntos correspondientes a las estrellas más brillantes están situados casi todos más a la derecha. Se observa todavía mejor esta regularidad si se representan en un mismo diagrama HR las estrellas de distintos cúmulos estelares, como se ha hecho en la figura 2-10. La secuencia principal está trazada con una línea delgada y los pun-

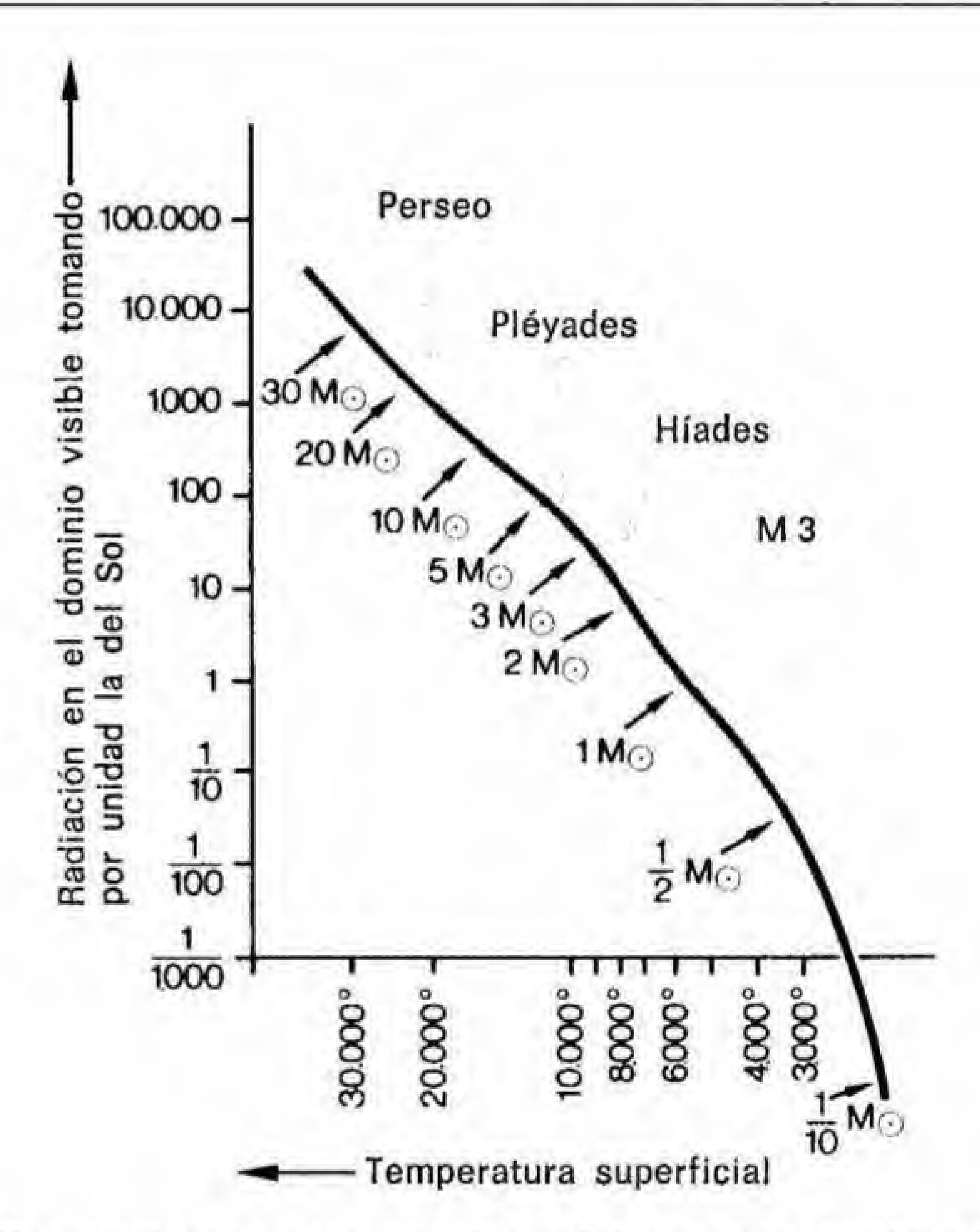


Fig. 2-10. Desviación de varios cúmulos estelares con relación a la secuencia principal (según Allen Sandage). Las líneas de trazo grueso indican la situación de las estrellas de varios cúmulos estelares. Un cúmulo de Perseo tiene la secuencia principal de mayor desarrollo hacia arriba. Luego el cúmulo se desvía hacia arriba a la derecha. El cúmulo globular M3 tiene la secuencia principal más corta; a poca altura se desvía ya hacia la derecha. Las flechas de la izquierda de la línea indican donde están situadas las estrellas de la secuencia principal de determinada masa. Los números al lado de las flechas dan el valor de las masas en múltiplos de la masa solar. El cúmulo estelar de Perseo contiene todavía estrellas de la secuencia principal de 10 a 15 masas solares, mientras que las estrellas de la secuencia principal con más masa del cúmulo globular M3 tienen solamente unas 1,3 masas solares.

tos ocupados por estrellas de distintos cúmulos están indicados con líneas gruesas. Vemos que todos los cúmulos estelares tienen en común un trozo de la secuencia principal, pero que todos se "desvían" hacia la derecha, es decir, que las estrellas de gran brillo ya no caen sobre la secuencia principal sino a su derecha. Los puntos en los que las líneas se ramifican de la secuencia principal varían de un cúmulo estelar a otro. Sabemos que a lo largo de la secuencia principal las masas disminuyen hacia arriba, por tanto podemos decir que en un cúmulo estelar dado las estrellas situadas por debajo de una masa determinada son estrellas de la secuencia principal, mientras que en el dominio de las masas mayores la secuencia principal no está ocupada. Esta observación ha proporcionado la clave final para comprender el desarrollo temporal de las estrellas.

Cuando una estrella evoluciona a lo largo del tiempo, cuando envejece, cambian sus características. Cambian especialmente su temperatura superficial y su luminosidad. El punto del diagrama HR que representa esta estrella se desplaza a lo largo del tiempo. Si por ejemplo la estrella era al principio una gigante roja y después de millones de años acaba convertida en una enana blanca, su punto representativo en el diagrama HR se habrá desplazado de arriba a la derecha hacia abajo a la izquierda. Si nuestras vidas fueran muy largas y pudiéramos continuar midiendo y emplazando las estrellas a lo largo de millones y miles de millones de años para poder representarlas en el diagrama HR, veríamos moverse los puntos representativos de las estrellas, y comprobaríamos que atraviesan con rapidez determinados dominios, demorándose en cambio en otros. Veríamos en definitiva las *trayectorias evolutivas* de las estrellas en el diagrama HR.

Sin embargo, nosotros sólo disponemos de un cuadro instantáneo. Sólo vemos el punto que ocupan actualmente las estrellas en el diagrama*. Nos sorprende entonces que las estrellas cercanas al Sol se acumulen sobre la secuencia principal. ¿Qué significa esto? ¿Significa que los puntos del diagrama HR recorren la banda de la secuencia principal con una especial lentitud y permanecen en ella un cierto tiempo? En este caso si observáramos un grupo de estrellas de edades distintas, muchas de ellas se encontrarían precisamente en esta banda.

* Dicho con más precisión: vemos el lugar que ocupaban cuando emitían la luz que ahora captamos. Sin embargo, para el estudio de la evolución de las estrellas de la Vía Láctea el tiempo que tarda la luz en llegar a nosotros es pequeño comparado con los intervalos de tiempo que tardan en evolucionar las estrellas; por tanto, no hay que aplicar la anterior distinción.

Hemos observado este mismo efecto en la vida diaria. ¿Por qué motivo hay en el mundo más personas adultas que niños? Porque sólo somos niños durante unos 15 años, y en promedio vivimos más de 50 años como adultos. Si observamos un grupo de personas de edades distintas, por ejemplo los habitantes de nuestra ciudad, comprobamos que la mayoría se encuentra en el estadio adulto. ¿Constituye también la secuencia principal un estadio en el que permanece durante largo tiempo una estrella en el transcurso de su historia?

Recordemos que el mismo Sol es una estrella de la serie principal. Sabemos que el Sol apenas ha cambiado desde hace miles de millones de años, es decir, que está en la secuencia principal desde hace miles de millones de años. Hemos visto que la energía almacenada en el Sol en forma de hidrógeno basta para cubrir las necesidades de la radiación que emite durante todo este largo intervalo. ¿Cubren quizá todas las estrellas de la secuencia principal sus necesidades de radiación mediante la fusión del hidrógeno? ¿Permanecen mucho tiempo inalteradas precisamente porque esta fuente de energía es tan generosa, y es quizá a consecuencia de esto que las estrellas se acumulen en la secuencia principal del diagrama HR?

Supongamos de entrada que todas las estrellas de la secuencia principal cubran sus necesidades energéticas mediante la conversión del hidrógeno en helio. Hemos calculado ya el tiempo que podrían estar emitiendo energía las estrellas con este sistema basándonos en los ejemplos del Sol y de Spica. Si suponemos que el 70 % de la masa estelar es hidrógeno y que el agotamiento del combustible nuclear se hace perceptible cuando se ha transformado ya el 10 % del hidrógeno, calculamos que el Sol tendrá una duración de 7.000 millones de años y que Spica, cuya masa es diez veces la del Sol y su luminosidad es diez mil veces la del Sol, sólo podrá brillar como ahora durante unos millones de años. Podemos calcular del mismo modo para todas las estrellas de la secuencia principal durante cuánto tiempo podrán cubrir sus necesidades luminosas mediante la fusión del hidrógeno. Tomemos una estrella cualquiera de la secuencia principal de la figura 2-3. Podemos leer en el diagrama su luminosidad y deducir la masa que corresponde a ella utilizando la relación masa-luminosidad de la figura 2-4, válida para las estrellas de la secuencia principal. Si comparamos la energía nuclear almacenada en esta masa con su luminosidad, es decir,

con la energía emitida hacia el Universo exterior por segundo, tendremos el tiempo que puede durar este depósito de energía. La figura 2-11 indica la duración del hidrógeno para las estrellas de la serie principal calculada por este sistema. Se confirma lo que ya hacía suponer el ejemplo de Spica. Cuanto más grande es la masa de una estrella de la secuencia principal, con mayor ligereza gasta su energía, y más breve es el período de tiempo que alcanza a cubrir su reserva de hidrógeno.

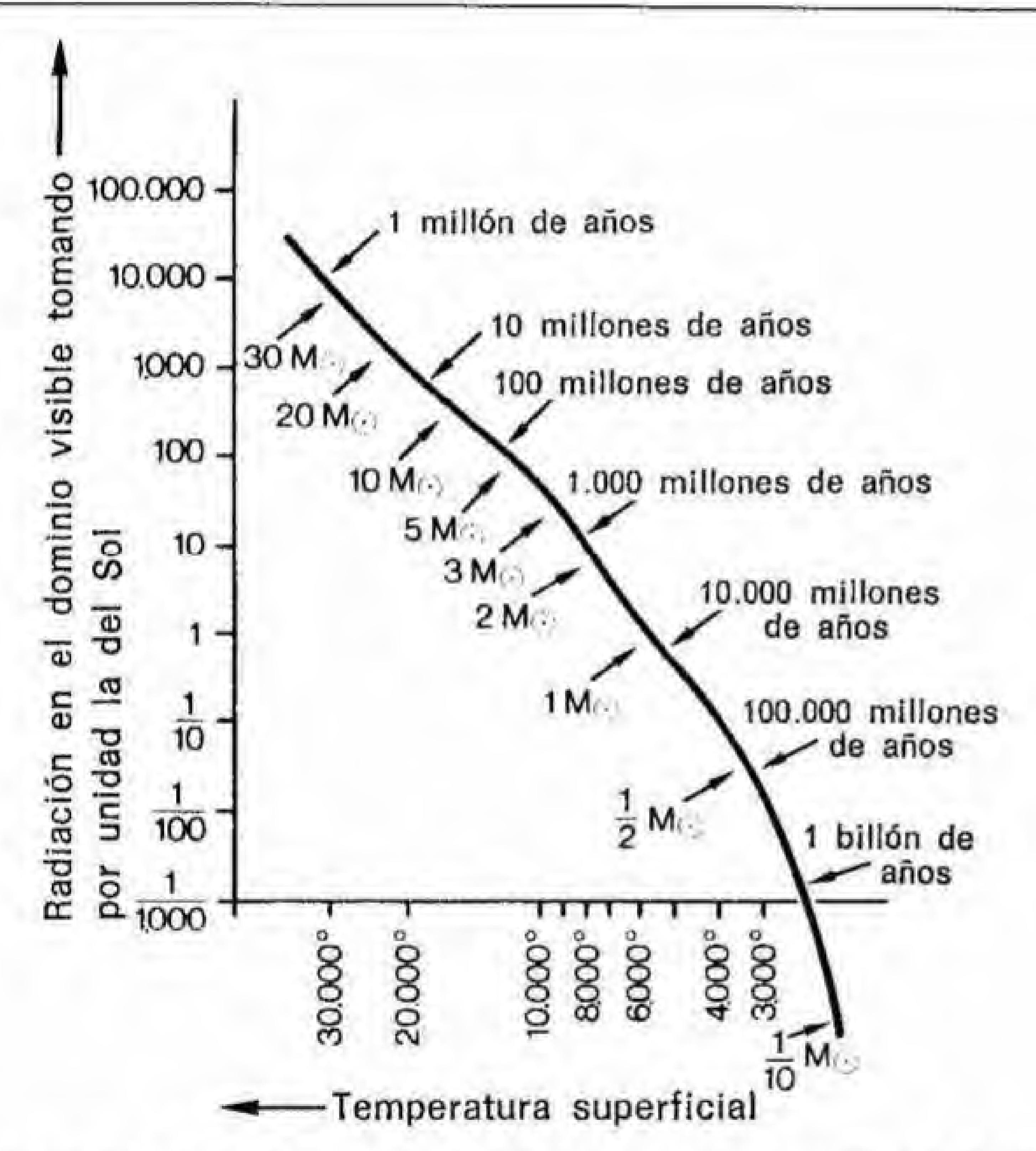


Fig. 2-11. Secuencia principal del diagrama HR. A la izquierda las flechas indican la situación que ocupan en la secuencia principal estrellas de masas determinadas (tomando de nuevo como unidad la masa solar $M_{\odot}$). La masa determina la reserva de energía a disposición de cada estrella y este dato junto con la luminosidad que corresponde a cada punto de la secuencia principal permite calcular el tiempo durante el cual una estrella situada en un punto concreto puede mantener su luminosidad actual con las reservas de que dispone. Las flechas de la derecha indican los correspondientes intervalos de tiempo. Las estrellas cuya masa es igual a 30 masas solares apenas duran con sus reservas de hidrógeno un millón de años. Las estrellas de media masa solar pueden durar casi cien mil millones de años. Una comparación con la figura 2-10 permite evaluar la edad del cúmulo estelar.

Uno, después de ocuparse durante toda una vida de las estrellas, se sorprende de lo humanas que pueden ser. En este caso, cuanto mayor es la masa, menor será la esperanza de vida.

LA EDAD DE LOS CÚMULOS ESTELARES

Si imaginamos un grupo de estrellas de masas distintas pertenecientes a la secuencia principal, pero todas de la misma edad y viviendo todas de la fusión del hidrógeno, observaremos primero los efectos del agotamiento en las estrellas de gran masa situadas en lo alto de la secuencia principal. Luego las estrellas de masa cada vez menor irán agotando también su reserva de energía. Al cabo de 7.000 millones de años las estrellas de masa igual al Sol mostrarán igualmente síntomas de agotamiento.

¿Observamos precisamente este efecto en los cúmulos estelares? Miremos de nuevo en la figura 2-8 el diagrama HR correspondiente a las Híades. La secuencia principal de este cúmulo estelar está ocupada hacia arriba hasta una emisión equivalente a 20 veces la luminosidad del Sol en el dominio visible, lo cual corresponde a unas 2,5 masas solares. La vida a base de hidrógeno de una estrella de tal masa alcanza 800 millones de años (véase la fig. 2-11). Si un grupo de estrellas de igual edad vive 800 millones de años gracias a la fusión del hidrógeno, las estrellas de masa superior a 2,5 masas solares deben estar agotando ya su hidrógeno, mientras que las estrellas de menor masa pueden vivir todavía honradamente de sus reservas de hidrógeno. ¿Explica esto quizá que la parte superior de la secuencia principal de las Híades no esté ocupada?

Otros cúmulos estelares abandonan la secuencia principal en otros niveles de luminosidad, y por tanto con otras masas. Por ejemplo, las Pléyades tienen todavía estrellas de la serie principal con luminosidades 140 veces superiores a la del Sol; esto corresponde a estrellas de más de 6 masas solares, cuya vida basada en el hidrógeno dura sólo 100 millones de años. Las estrellas de mayor brillo en el diagrama HR de las Pléyades no están situadas exactamente sobre la secuencia principal, sino algo a su derecha: son los primeros síntomas del efecto de agotamiento. Podemos, pues, imponer una ordenación temporal muy general a los cúmulos estelares. Se dibuja el diagrama HR y se observa hasta qué altura está ocupada la secuencia principal. En la figura 2-10 se ha señalado esquemáticamente dónde abandonan la secuencia principal varios cúmulos es-

telares: el más joven es un cúmulo estelar de Perseo, que ocupa la secuencia principal hasta 1.000 veces la luminosidad del Sol, y su edad es de unos 10 millones de años. Vienen luego las Pléyades, las Híades y finalmente el viejo cúmulo globular M 3. Este último ocupa la secuencia principal hasta una luminosidad 3 veces la del Sol, y sus estrellas más brillantes de la secuencia principal están compuestas de una masa algo inferior a 1,3 masas solares. Si están actualmente a punto de abandonar la secuencia principal, su edad debe ser de 6.000 a 10.000 millones de años.

¿Es cierto realmente que la desviación de los cúmulos estelares de la secuencia principal del diagrama HR constituye un síntoma del agotamiento de su reserva de hidrógeno? En caso afirmativo hemos comprendido ya una parte esencial de la evolución de las estrellas: una estrella se mantiene en la secuencia principal el tiempo necesario para que su hidrógeno se agote. A continuación se desplazará por la derecha hacia el dominio de las gigantes rojas, pues las estrellas que han abandonado la secuencia principal están situadas a la derecha de ella. De ser esto cierto se plantearán nuevas preguntas: ¿Qué edad tienen los cúmulos estelares más viejos y qué edad tienen los más jóvenes? ¿Qué eran las estrellas antes de que empezara la fusión de su hidrógeno? ¿Qué sucede cuando se agota la reserva de hidrógeno de una estrella? Sabemos ya que se convierte en gigante roja, pero no puede continuar emitiendo energía mucho tiempo, porque su energía nuclear está bastante agotada.

No debemos olvidar, sin embargo, que de momento sólo *suponemos* que las propiedades de las estrellas de los cúmulos estelares tienen alguna relación con el agotamiento de su reserva de energía nuclear. De momento esta hipótesis parece concordar muy bien con la observación, pero con los medios utilizados hasta ahora todavía ignoramos si las temperaturas y las densidades en el interior de las estrellas son tan altas que permiten el desarrollo de reacciones nucleares de modo que la estrella funcione como una central nuclear. Las temperaturas de las superficies estelares son en todo caso insuficientes. ¿Cómo podemos saber las temperaturas que reinan en el interior de las estrellas? La luz que nos llega de las estrellas procede de una delgada capa superficial. En el caso del Sol, la luz procede de una “atmósfera” cuya masa es sólo una cienmilmillonésima parte de masa total del Sol. Nosotros no podemos ver a mayor profundidad. Sin embargo, sabemos más cosas sobre el interior del Sol que sobre el interior de la Tierra. Voy a explicar en el siguiente capítulo cómo ha sido posible esto.

III. LAS ESTRELLAS COMO CENTRALES NUCLEARES

Todavía no sabemos si las estrellas brillan realmente gracias a reacciones nucleares. Hasta ahora no conocemos ninguna fuente de energía tan productiva como la nuclear, pero de ello no debemos deducir sin más su inexistencia. ¿No podrían futuros descubrimientos de la física proporcionarnos posibilidades desconocidas hoy en día para producir energía, como hacen anticipadamente algunos autores de ciencia ficción? Hemos visto en el capítulo anterior que algunas propiedades de los cúmulos estelares se corresponden muy bien con la idea de la producción de energía nuclear en las estrellas, y ahora, en este capítulo y en el siguiente, vamos a ver que esta idea es realmente correcta. No es preciso que busquemos nuevas e inéditas fuentes de energía. Es el físico nuclear quien en último extremo explica al astrónomo por qué brillan las estrellas. Sin embargo, a principios de los años veinte los físicos se negaban todavía a creer la existencia de reacciones nucleares dentro de las estrellas. Esto se explica por la misma estructura del átomo.

LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DEL ÁTOMO

Los materiales de nuestro mundo, las piedras y los minerales, las moléculas presentes en el aire y en los mares, las células de las plantas y de los animales, y también las nebulosas gaseosas y las estrellas del Universo en toda su multiplicidad están compuestas por sólo 92 elementos constitutivos: los *elementos químicos*. Este descubrimiento del siglo pasado ha simplificado profundamente la imagen del Universo. Correspondió a nuestro siglo demostrar que estos 92 elementos químicos están formados por sólo tres tipos de ele-

mentos constructivos: los *protones*, los *neutrones* y los *electrones*. Los átomos del elemento helio, por ejemplo, sólo se distinguen de los del elemento carbono por la manera distinta de combinar en números distintos estos tres elementos constructivos (véase la figura 3-1).

Un átomo de helio consta de un núcleo que contiene dos protones y dos neutrones. El protón es una partícula de carga positiva, y por tanto el núcleo del átomo de helio tiene carga positiva. A su alrededor giran dos partículas ligeras, de carga negativa, dos electrones, que forman la *envoltura electrónica* del átomo de helio. La estructura del elemento carbono es más complicada. Consta también de un núcleo formado por protones y neutrones. Este núcleo tiene seis protones y seis neutrones, y a su alrededor, en la envoltura giran seis electrones. El átomo más sencillo es el de hidrógeno. El núcleo consta de un protón alrededor del cual se mueve un electrón.

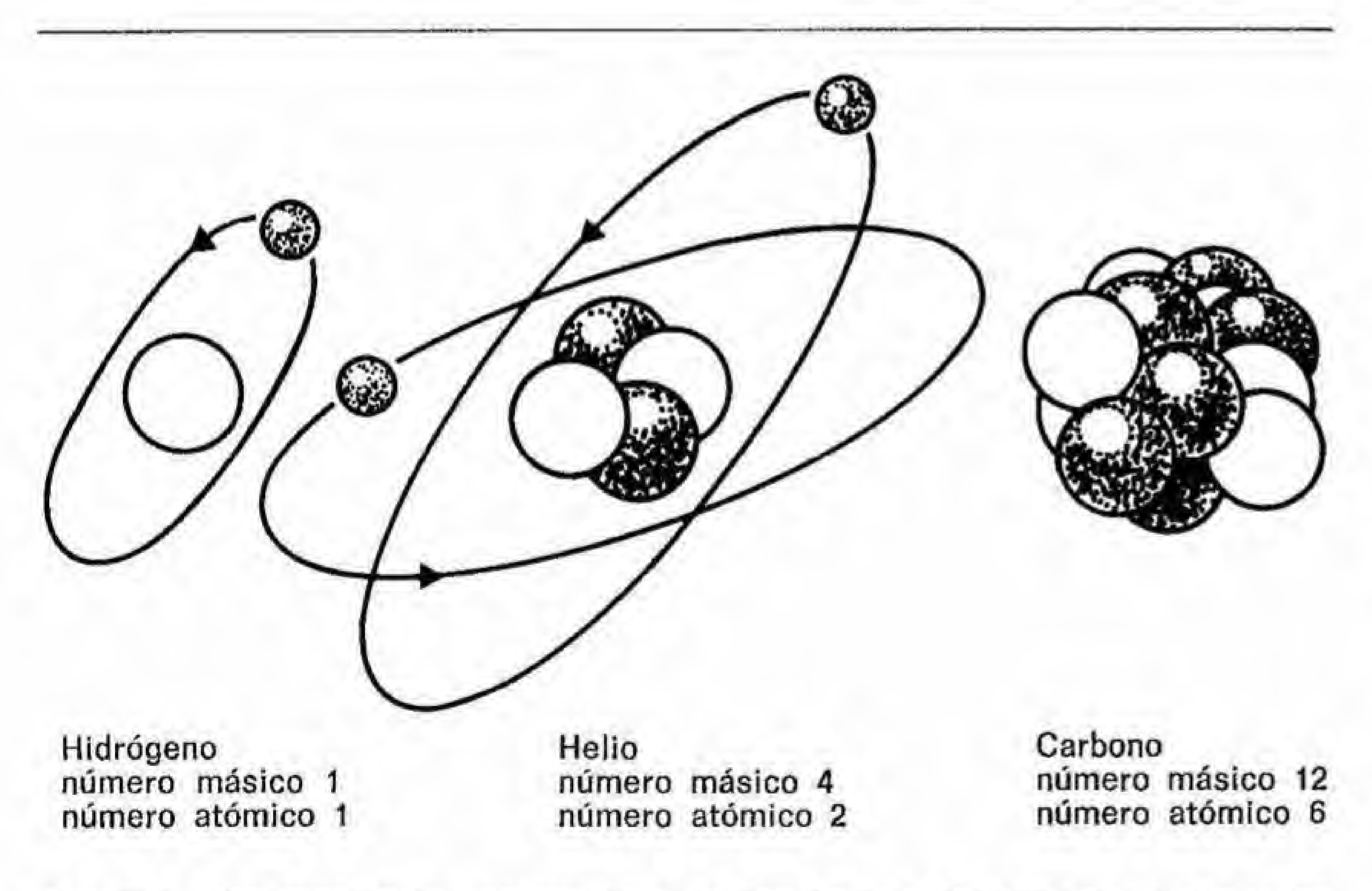


Fig. 3-1. Representación esquemática de los átomos de hidrógeno, helio y carbono. Los protones están esquematizados en blanco y los neutrones en gris oscuro. Las órbitas de los electrones que giran alrededor del núcleo (dibujados en gris claro) no están a escala. No se han dibujado los seis electrones que orbitan el núcleo del carbono.

El protón y el neutrón tienen aproximadamente la misma masa. Se les llama partículas pesadas, aunque no pesen nada en comparación con los cuerpos a los que nosotros estamos acostumbrados. Si pudiéramos poner un billón de estas partículas pesadas en una balanza sólo pesarían una billonésima parte de gramo. El electrón sólo tiene una diezmilésima parte de la masa del protón. El protón tiene carga positiva, el electrón carga negativa, de modo que un protón y un electrón juntos son eléctricamente neutros. El neutrón carece de carga. En ocasiones aparece también una partícula cuya masa es como la del electrón y cuya carga es positiva: el *positrón*. Pero su vida es corta. Si se aproxima a un electrón, se fusiona inmediatamente con él. El electrón y el positrón desaparecen juntos emitiendo un pequeño rayo de luz.

Todos los núcleos atómicos están formados por un número determinado de protones y de neutrones. Alrededor del núcleo se mueven normalmente tantos electrones como protones hay en él, de modo que la carga positiva de los protones del núcleo queda neutralizada por los electrones negativos. La cosa, sin embargo, no es tan sencilla. La materia del mundo si se estudia más a fondo no está compuesta por tres tipos de elementos constructivos, a saber: protones, neutrones y electrones, sino sólo por dos. En los núcleos atómicos, los protones y los electrones pueden fusionarse dando neutrones. Un neutrón fuera del núcleo atómico se desintegra al cabo de unos 17 minutos en un protón y un electrón. Podemos pues decir que el Universo en toda su multiplicidad sólo consta realmente de protones y de electrones. El número de protones sumado al de neutrones en el núcleo atómico se llama número másico del núcleo, el número de sus protones se llama número atómico. Los átomos de hidrógeno tienen pues el número másico 1 y el número atómico 1. El número másico del helio es 4 y su número atómico 2. El tipo más corriente de átomo de hierro tiene de número másico 56 y de número atómico 26. El número atómico indica también el número de electrones que han de girar alrededor del núcleo para que el átomo en su conjunto sea neutro eléctricamente. La envoltura electrónica determina las propiedades químicas del material. Por ello los elementos de número atómico distinto son diferentes químicamente, porque su envoltura electrónica es distinta. Los átomos que poseen idéntico número atómico pero un número distinto de neutrones, son químicamente idénticos. Sólo se diferencian por el número másico. Se llaman *isótopos* de un mismo elemento. Además del hidrógeno normal, hay un isótopo suyo llamado hidró-

geno pesado, cuyo núcleo además de un protón posee también un neutrón. Este isótopo del hidrógeno recibe el nombre de *deuterio*. Existe en la naturaleza en diminutas cantidades.

Es decir, que un pedazo de hierro de un globo aerostático, por mucho que se diferencie del gas de hidrógeno contenido en él, está compuesto, como el gas, por un conjunto de protones y electrones. Si pudiéramos apartar 56 átomos de hidrógeno y ordenar como quisiéramos sus 56 protones y sus 56 electrones, tomando 30 electrones y un número igual de protones para construir 30 neutrones, estos 30 neutrones sumados a los 26 protones que quedaban del número original se unirían formando un núcleo atómico; y si al final dejáramos que los 26 electrones restantes se movieran alrededor de este núcleo, tendríamos un átomo de hierro formado a partir de los 56 átomos de hidrógeno.

Si tomáramos cuatro átomos de hidrógeno y fabricáramos dos neutrones con dos electrones y dos protones suyos, que luego uniríamos a los protones restantes para formar un núcleo atómico, tendríamos otro núcleo de número másico 4 y de número atómico 2, alrededor del cual podrían girar los dos electrones restantes. Habríamos fusionado hidrógeno y lo habríamos convertido en helio. Este proceso libera energía. Pero no es tan fácil fusionar entre sí los núcleos atómicos.

ARTHUR EDDINGTON Y EL ORIGEN DE LA ENERGÍA ESTELAR

Sir Arthur Eddington tenía una famosa cátedra de astronomía en la Universidad de Cambridge, la "Plumian Professorship". En el año 1926 publicó su obra "The Internal Constitution of the Stars", en castellano "La constitución interna de las estrellas". Era una brillante exposición de los conocimientos físicos de aquel entonces sobre el interior de las estrellas, conocimientos a los que el mismo Eddington había contribuido de modo esencial. Se sabía ya cómo funcionaba en principio una estrella. Faltaba sin embargo la clave concreta. Hacía falta saber cómo se generaba la energía.

Era evidente que la materia estelar con su riqueza en hidrógeno podía ser suministradora ideal de energía. Se sabía que la transformación del hidrógeno en helio liberaba energías que podían cubrir las necesidades del Sol y de las estrellas permitiéndoles brillar durante miles de millones de años. Estaba claro, pues, que se había descubierto una magnífica fuente de energía, sólo faltaba comprender en qué circunstancias tenía lugar la fusión del hidrógeno. Pero en aquel entonces se estaba todavía muy lejos de poder llevar a cabo experimentalmente la transformación del hidrógeno en helio.

A los astrofísicos de aquella época no les quedaba otra salida que confiar en que las estrellas fuesen a pesar de todo gigantescas centrales nucleares, pues era imposible imaginar otro proceso que proporcionara energía suficiente para cubrir durante miles de millones de años las necesidades del Sol. Eddington fue quien se expresó de modo más consecuente. Refiriéndose a las numerosas y repetidas mediciones de la luminosidad de las estrellas llevadas a cabo por los astrónomos, escribió: «Las mediciones de la liberación de energía nuclear son una de las observaciones astronómicas más frecuentes, y si en mi obra no está todo equivocado disponemos de muy buenos conocimientos sobre la densidad y la temperatura que debe poseer la materia para que estos procesos puedan tener lugar.» Pero por desgracia los físicos de su época no creían que los núcleos atómicos pudiesen reaccionar entre sí dentro de las estrellas.

Eddington pudo ya entonces evaluar las temperaturas que debían existir en el interior del Sol. El Sol mantiene su consistencia gracias a la gravedad de la masa que contiene su cuerpo. La gravedad atrae la materia hacia el centro. Pero la materia solar no llega a precipitarse hacia el punto central del astro porque el gas solar ejerce una contrapresión. Esta presión tiende a impulsar la materia hacia fuera, es decir, que actúa en contra de la gravedad. Ambas fuerzas están en equilibrio. Sucede lo mismo en la atmósfera terrestre. Si no hubiese ninguna gravedad, la presión del aire lo dispersaría por el espacio. Pero si no existiera la presión atmosférica, la envoltura de aire de la Tierra caería sobre su superficie. En el caso del Sol puede calcularse la gravedad con que la materia solar se atrae a sí misma. La fuerza ejercida por la presión gaseosa que equilibra esta gravedad ha de tener el mismo valor. La presión de un gas está en función de su densidad y de su temperatura. Conocemos la densidad de la materia solar, porque sabemos el valor de la masa del Sol y el volumen que ocupa. ¿Qué magnitud tiene la presión ejercida por la materia solar? Depende de la temperatura: cuanto más caliente es un gas, mayor es su presión. ¿Qué temperatura ha de tener un gas en el interior del Sol para que pueda equilibrar su gravedad?

Eddington calculó que la temperatura del centro de las estrellas era de unos 40 millones de grados. Esta cifra puede parecernos muy

elevada, pero los físicos nucleares la consideraron demasiado baja para que pudieran tener lugar con ella reacciones nucleares. A esta temperatura los átomos del interior del Sol se mueven con velocidades de 1.000 kilómetros por segundo. Los átomos de hidrógeno en estas condiciones han perdido hace tiempo sus electrones, y sus protones se desplazan libres por el espacio. En ocasiones choca un protón con otro, pero ambos están cargados positivamente y se repelen de nuevo. Cuando las velocidades son de 1.000 kilómetros por segundo, los protones pasan muy cerca unos de otros, pero las fuerzas eléctricas de repulsión los desvían antes de que puedan aproximarse lo suficiente para fusionarse. Además, para formar un núcleo de helio a partir de átomos de hidrógeno han de coincidir simultáneamente en un mismo punto cuatro protones y dos electrones, o sea, en total seis partículas, y este suceso es muy improbable. Y aunque los seis coincidieran casualmente, las fuerzas eléctricas desviarían sus trayectorias impidiendo la fusión. Sólo si las partículas alcanzaran una temperatura de varias decenas de miles de millones de grados poseerían suficiente impulso para acabar fusionándose a pesar de las fuerzas eléctricas de repulsión. Los físicos consideraban, pues, que el Sol, con su interior de 40 millones de grados, era demasiado frío para transformar el hidrógeno en helio. Pero Eddington estaba convencido de que sólo la energía nuclear puede alimentar las estrellas, y escribió con confianza: «No discutimos con el crítico cuando afirma que las estrellas no son lo bastante calientes para permitir este proceso, sólo le decimos que debe buscar y encontrar un lugar más caliente.» En realidad Eddington creía que las condiciones fijadas por los físicos para la formación de helio a partir de hidrógeno eran todavía muy inciertas. Él prefería fiarse de sus estrellas y creer que los físicos acabarían descubriendo un sistema para transformar el hidrógeno en helio a la temperatura relativamente reducida de 40 millones de grados. Y al final Eddington tendría razón.

GEORGE GAMOW Y SU "EFECTO TÚNEL"

Aproximadamente en la misma época en que Eddington escribía insistiendo tozudamente en que el hidrógeno se transformaba en helio en el interior de las estrellas, empezaba la gran revolución de la física, iniciada por Louis de Broglie en París, por Niels Bohr en Copenhague, por Erwin Schrödinger en Zurich y por los físicos de

Gotinga. Floreció allí la gran escuela de la mecánica cuántica fundada por Max Borns; fueron los años dorados de Gotinga. Muchos de los jóvenes físicos que acudieron allí procedentes de todo el mundo fueron luego famosos: Werner Heisenberg y Robert Oppenheimer, Paul Dirac y Edward Teller. Uno de ellos era el joven ruso George Gamow. Gamow se enfrentó con un problema de radiactividad, el tema de la desintegración natural de los núcleos atómicos.

Hay elementos químicos que se desintegran espontáneamente. El uranio se convierte en torio, y el torio en radio, que también se desintegra. El núcleo del tipo más frecuente de radio consta de 88 protones y 138 neutrones. Un átomo de radio, al cabo de un tiempo determinado, expulsa por sí solo dos neutrones y dos protones transformándose en un núcleo de masa menor. Por su parte, las partículas expulsadas se mantienen unidas y forman un núcleo de helio. Era difícil entender que el núcleo del radio pudiera expulsar un núcleo de helio. Los componentes del núcleo del radio están confinados y apretados en un espacio reducido, y se mantienen unidos por la acción de fuerzas muy potentes, las *fuerzas nucleares*. Estas fuerzas son mucho más intensas que la repulsión eléctrica de los protones. Si estas fuerzas nucleares no existieran, el núcleo del radio estallaría proyectando en todas direcciones los protones componentes. Las fuerzas nucleares, sin embargo, tienen un alcance reducido. Si una parte del núcleo se aleja demasiado del resto, predomina la repulsión eléctrica y ambas partes se separan. Pero esto según la física clásica no debería suceder, porque las fuerzas nucleares mantienen la cohesión del núcleo. A pesar de todo, esto es lo que sucede en la naturaleza.

Gamow resolvió el problema de la desintegración del átomo. Es cierto que los componentes de un núcleo de radio están unidos entre sí por las fuerzas nucleares y que en realidad no pueden separarse unos de otros. Pero la moderna mecánica cuántica enseña que esto sólo puede cumplirse con una probabilidad determinada. Aunque el proceso sea imposible según la mecánica clásica, una parte del núcleo, a pesar de las intensas fuerzas de ligazón, puede alejarse lo suficiente del resto, para que la repulsión eléctrica supere las otras fuerzas, y separe todavía más los dos productos de fisión. El proceso es improbable, pero tiene lugar. En el caso de los átomos de uranio hay que esperar más de mil años para que expulsen un núcleo de helio.

Este fenómeno se denomina *efecto túnel*, y sólo se ha podido comprender gracias a la mecánica cuántica. El nombre se inspira en

una imagen muy expresiva. Los componentes del núcleo de radio están sujetos por las fuerzas nucleares, como si estuvieran separados del mundo exterior por una cadena de montañas. Su energía es insuficiente y no les permite superar la cumbre de las montañas. Según la mecánica clásica, estas montañas son un obstáculo insuperable. Sin embargo, según la mecánica cuántica en ocasiones sucede que un componente del núcleo aparezca repentinamente al otro lado de la montaña, como si en lugar de haberla escalado la hubiese atravesado por un túnel.

Pero, si algunas partículas pueden atravesar la cordillera de dentro afuera, también otras partículas, según Gamow, pueden entrar en el núcleo atómico atravesando la montaña.

EL EFECTO TÚNEL EN LAS ESTRELLAS

Volvamos a las estrellas y al tema del origen de su energía discutido en los años veinte. Si los núcleos de radio hacen lo que en realidad no deberían, ¿no podrían también los protones del Sol hacer lo que los físicos les prohíben? Las fuerzas nucleares del elemento radio impiden un excesivo alejamiento de los protones y la entrada en acción de la repulsión eléctrica. Sin embargo, el núcleo del radio acaba desintegrándose, contra todo pronóstico. ¿No podrían también los protones del Sol fusionarse, aunque en realidad no debieran?

Los físicos Robert Atkinson y Fritz Houtermans aplicaron el efecto túnel de Gamow y resolvieron el enigma de la generación de energía en las estrellas. En marzo de 1929 enviaron un manuscrito a la redacción de "Zeitschrift für Physik" titulado "Sobre la posibilidad de la formación de elementos en las estrellas". El trabajo principia con estas palabras: «Gamow demostró recientemente que partículas de carga positiva pueden introducirse en los núcleos atómicos, aunque su energía sea insuficiente para ello según los conceptos clásicos...» Los autores explicaban en su escrito que los núcleos de hidrógeno podían acercarse lo suficiente para fusionarse a las temperaturas relativamente bajas del interior de las estrellas, a pesar de que la física clásica exigía para el proceso temperaturas de decenas de miles de millones de grados. Un protón en una estrella está separado de los demás protones por un campo eléctrico que equivale a una montaña infranqueable, y sin embargo consigue, quizás al cabo de mucho tiempo, superar esta montaña, aunque su energía

sea insuficiente; el protón consigue llegar al otro lado gracias al efecto túnel. La probabilidad desde luego no es muy grande, pero el efecto actúa, ciertamente, en el interior del Sol y en el interior de otras estrellas con la frecuencia suficiente para que la estrella pueda vivir de la energía que libera el proceso. Atkinson y Houtermans demostraban lo que Eddington había sólo supuesto: el Sol y las estrellas cubren sus necesidades de energía con la transmutación del hidrógeno en helio.

Su trabajo sentó las bases de la teoría de las reacciones termonucleares, teoría que acabaría explicando la creación de energía en las estrellas. Acababa pues de descubrirse el origen de la energía del Sol y de las estrellas.

Cuando Robert Jungk estaba reuniendo materiales para su libro "Más brillante que mil soles", Houtermans le contó un recuerdo de aquella época: «Por la tarde, después de concluir el artículo me fui a pasear con una guapa chica, y cuando anocheció empezaron a brillar esplendorosamente las estrellas. "¡Cómo brillan, qué hermoso!", exclamó mi acompañante. Yo me ufané un poco y dije: "Desde ayer sé por qué brillan." Ella no dio muestras de impresionarse. ¿Quizá no me creía? Probablemente aquello en aquel momento le tenía sin cuidado.» Así lo cuenta Jungk en su libro.

Cuando me llamaron para trabajar en la Universidad de Gotinga, me propuse averiguar si la dama protagonista vivía todavía; pero como tantas otras empresas, tampoco ésta pasó de las buenas intenciones. La conocí siete años después en Atenas. Asistí a un congreso donde también estaban presentes los Atkinson, quienes se habían instalado mientras tanto en Norteamérica y vivían en Bloomington, Indiana. La señora Atkinson, una simpática berlinesa, me confirmó que Houtermans había pronunciado aquella frase, pero que la situación no había sido tan romántica como Jungk la había descrito. Me enteré también de otra cosa más importante. Pregunté al señor Atkinson por qué se había dedicado a este tema. Me contó que leyendo la obra de Eddington se había enterado del dilema de la creación de la energía en las estrellas, concretamente de que las temperaturas del interior de las estrellas no eran suficientes para que los núcleos se fusionasen. Y sin embargo, Eddington estaba convencido de que sólo la energía nuclear podía cubrir las necesidades energéticas del Sol y de las estrellas. Atkinson habló de esto con Houtermans. El momento era propicio. Gamow acababa de escribir su obra, el problema se había hecho soluble y ellos dos lo resolvieron.

Desde entonces sabemos que en las estrellas pueden tener lugar reacciones nucleares. Pero, ¿qué tipo de reacciones nucleares? ¿Se fusionan protones con protones o penetran los protones en otros núcleos atómicos? ¿Y en este último caso, en qué núcleos penetran? La respuesta llegó diez años después.

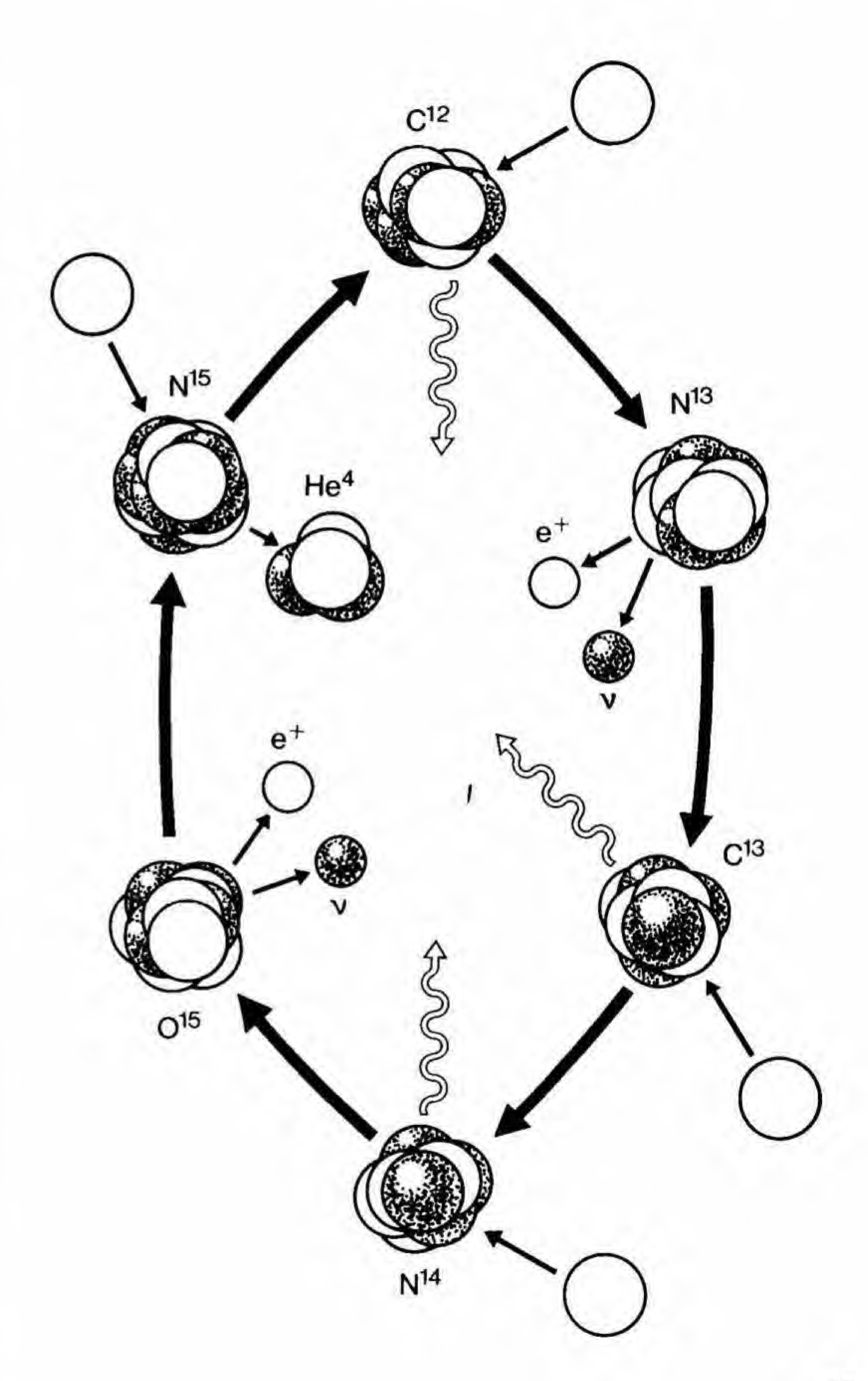
EL CICLO DEL CARBONO

¿Cómo se transforma el hidrógeno en helio dentro de las estrellas? Resolvieron este problema independientemente Hans Bethe en EE.UU. y Carl Friedrich von Weizsäcker en Alemania. Los dos descubrieron en 1938 la primera reacción que convierte el hidrógeno en helio y que puede proporcionar a las estrellas la energía que consumen.

El proceso es bastante complicado; presupone que en las estrellas además de hidrógeno hay otros elementos, por ejemplo el carbono. Los núcleos de carbono juegan el papel de *catalizadores,* como en la química. El hidrógeno se une con estos núcleos y forma en su interior átomos de helio. Luego los núcleos de carbono, sin haber sufrido por su parte ningún perjuicio, expulsan los átomos de hidrógeno convertidos, gracias a la fusión, en átomos de helio.

Como vemos en la figura 3-2, se trata de un proceso cíclico. Empecemos en el dibujo de arriba donde un núcleo de hidrógeno choca con un núcleo de carbono de peso atómico 12, que designamos por C^{12}. Gracias al efecto túnel, el núcleo de hidrógeno puede superar el campo eléctrico repulsivo del carbono y fusionarse con su núcleo. El nuevo núcleo está compuesto ahora por 13 partículas

Fig. 3-2. Transformación del carbono en helio según el ciclo del carbono. La ▶ representación es la misma que la de la figura 3-1. Las flechas onduladas indican que un átomo emite radiación; los positrones están señalados por e^+ y los neutrinos por ν.



pesadas. La carga del núcleo original de carbono, o sea, su número atómico, ha aumentado debido a la carga positiva del protón añadido. Tenemos ahora un núcleo del elemento nitrógeno, de número másico 13. Lo designaremos por N^{13}. Este tipo de nitrógeno es radiactivo y al cabo de un tiempo expulsa dos partículas ligeras: un positrón y un *neutrino,* de las que hablaremos más tarde. El nitrógeno se transforma ahora en carbono de número másico 13, o sea, en C^{13}. El núcleo vuelve a tener la misma carga que el átomo de carbono inicial, pero el número másico es ahora más elevado. Tenemos, pues, un isótopo del núcleo inicial. Si este isótopo del carbono recibe otro protón, forma de nuevo nitrógeno. Pero éste tiene ahora el número másico 14, o sea, es N^{14}. Si se une un protón más al nuevo átomo de nitrógeno, se transformará en O^{15}, es decir, en oxígeno de número másico 15. Este núcleo también es radiactivo, y emitirá un positrón y un neutrino, transformándose en N^{15}, es decir, en nitrógeno de número másico 15. Si recordamos que el proceso empezó con un carbono de número másico 12 y que ahora tenemos un nitrógeno de número másico 15, comprobaremos que la acumulación sucesiva de átomos de hidrógeno ha hecho el átomo cada vez más pesado. Si se une ahora otro protón al átomo de nitrógeno, éste emitirá dos átomos de hidrógeno y dos neutrones, o sea, cuatro partículas que forman en conjunto un núcleo de helio, transformándose de nuevo nuestro núcleo en el antiguo núcleo de carbono. El ciclo se ha cerrado.

El proceso ha consumido en conjunto cuatro protones y ha formado un núcleo de helio: el hidrógeno se ha transformado pues en helio. Y este proceso libera una cantidad de energía suficiente para que las estrellas puedan brillar durante miles de millones de años. La materia estelar se calienta gracias a los procesos parciales del ciclo. En parte porque los cuantos de radiación producidos en las reacciones transmiten la energía al gas estelar, y en parte porque los positrones se unen rápidamente con los electrones del medio emitiendo más cuantos de radiación y calentando todavía más la materia estelar. Los neutrinos se llevan una pequeña parte de la energía. En el capítulo 5 veremos las notables circunstancias que acompañan este proceso.

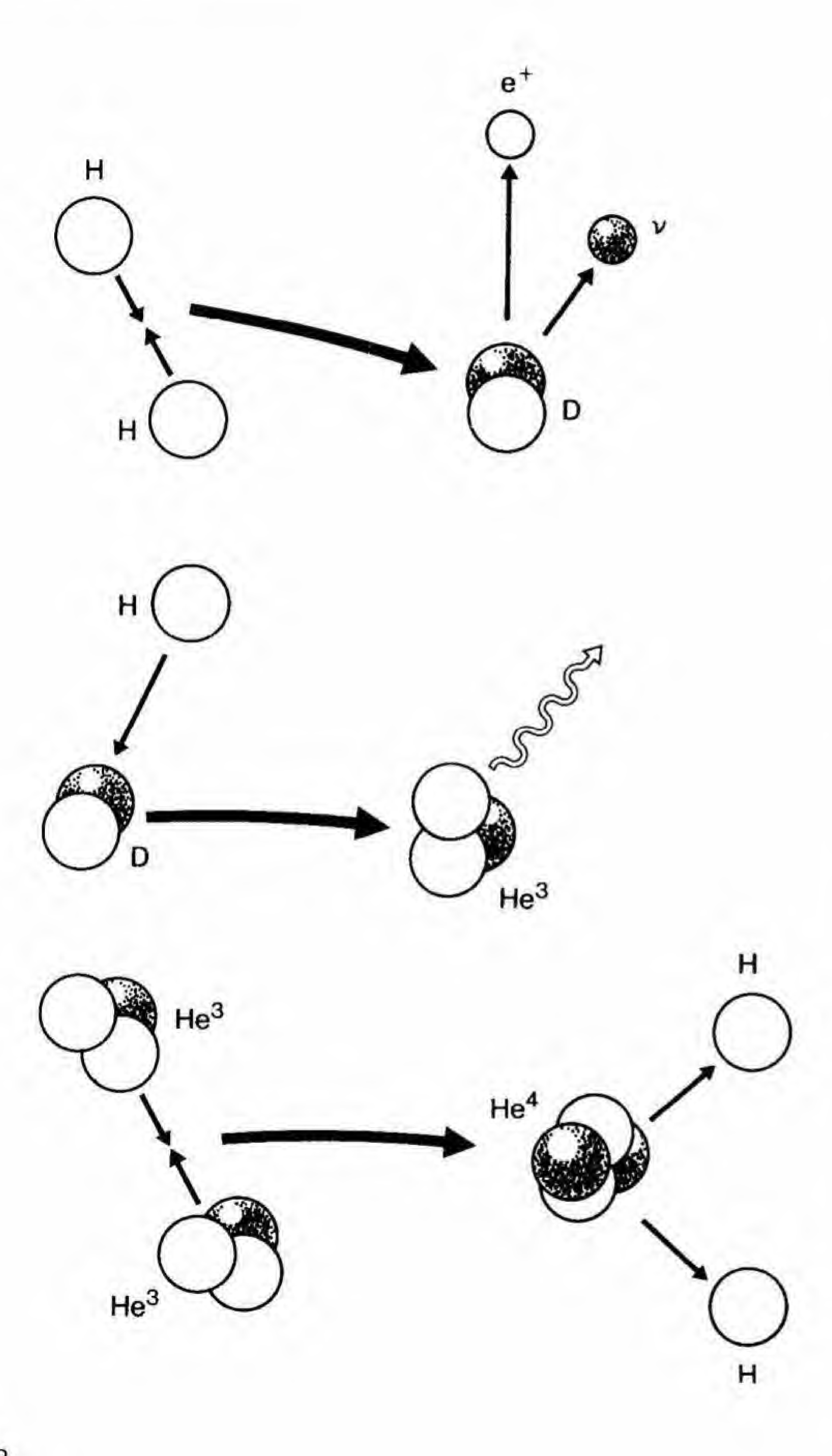
Bethe recibió en 1967 el premio Nobel de física por el ciclo del carbono que en 1938 habían descubierto él y von Weizsäcker. Al parecer el comité del premio Nobel olvidó con su impenetrable veredicto que en la mayoría de los casos el premio se concede compartido.

Sabemos que el ciclo sólo puede funcionar en presencia de los elementos catalizadores: carbono, nitrógeno y oxígeno. No es preciso que estén presentes los tres elementos. Basta con que haya uno de los isótopos que aparecen en el ciclo. Si empieza la reacción, los catalizadores necesarios para las reacciones siguientes se fabrican allí mismo. Más aún, una vez finalizado todo el ciclo, las reacciones determinan que los isótopos estén presentes en cantidades determinadas. La relación entre estas cantidades depende de la temperatura del ciclo. Actualmente los astrofísicos, gracias a sus métodos espectroscópicos de medición, pueden analizar la materia cósmica cuantitativamente y con buena precisión. Basta medir las proporciones de los isótopos C^{12}, C^{13}, N^{14} y N^{15} para saber no sólo que la materia del interior de las estrellas ha participado ya en la fusión del hidrógeno a través del ciclo del carbono, sino también la temperatura a la que ha tenido lugar la fusión. Además, el hidrógeno no dispone únicamente del ciclo del carbono para transformarse en helio. Hay otro proceso más simple cuya importancia, por lo menos en el caso del Sol, es superior. Se descubrió poco tiempo después.

LA CADENA PROTÓN-PROTÓN

El ciclo del carbono que acabamos de explicar en la sección anterior obliga a disponer de una cantidad determinada de carbono, oxígeno o nitrógeno. Los átomos de estos elementos no se consumen en el proceso; forman en cierto modo recintos protegidos donde los átomos de hidrógeno se transforman a lo largo del tiempo en átomos de helio. Hans Bethe y Charles Critchfield demostraron en el año 1938 que puede prescindirse del carbono, el oxígeno y el nitrógeno.

La figura 3-3 explica el proceso. Dos protones chocan y se fusionan. Emiten un positrón y un neutrino. El núcleo restante consiste ahora únicamente en un protón y un neutrón. Este núcleo tiene la misma carga que el hidrógeno, pero su masa es doble; es el hidrógeno pesado o deuterio. Si el núcleo de hidrógeno choca con un núcleo de deuterio, los dos núcleos se unen formando un átomo de helio, consistente en dos protones y un neutrón. Este helio no es todavía el helio "correcto"; es el isótopo ligero He^3; su número atómico es el del helio, pero su número másico es menor. Si ahora chocan dos núcleos de helio "ligero" producidos por el proceso anterior, se fusionarán formando un núcleo "correcto" de helio y libe-



ando al mismo tiempo dos núcleos de hidrógeno. En esta cadena, cuatro núcleos de hidrógeno han formado un núcleo de helio.

¿Cuál de los dos procesos actúa en las estrellas, la cadena protón-protón o el ciclo del carbono?

Si la temperatura es suficientemente alta, pueden darse ambos procesos en las estrellas. Cuando la temperatura es de 10 millones de grados, predominan los procesos de la cadena protón-protón. Si la temperatura es bastante más alta, predomina la producción de energía a través del ciclo del carbono.

Posiblemente la cadena protón-protón tuvo especial importancia en las primeras estrellas que se formaron en nuestro Universo. Se cree actualmente que al formarse el Universo, en la "Gran Explosión" primigenia, se formaron únicamente hidrógeno y helio, o sea, que faltaban los elementos catalizadores del ciclo del carbono*. Por tanto, las estrellas tuvieron que explotar la fusión del hidrógeno a través de la cadena protón-protón. Sólo más tarde, cuando se formó carbono a partir de helio en el interior de las estrellas, dispusieron las siguientes generaciones de estrellas de elementos catalizadores para el ciclo del carbono.

CREACIÓN DE LOS ELEMENTOS PESADOS

¿Qué sucede en una estrella cuando todo el hidrógeno se ha transformado en helio? Edwin Salpeter, profesor actualmente de la Universidad de Cornell en EE.UU., ha explicado el mecanismo que transforma el helio en carbono. Basta de hecho disponer de tres núcleos de helio. Si los unimos, tendremos un núcleo de carbono de número másico 12. Sin embargo, es muy improbable que coincidan

◄ **Fig. 3-3.** Cadena protón-protón. La representación es la misma que la de la figura 3-2. De nuevo el hidrógeno se transforma en helio. En el dibujo superior chocan entre sí dos núcleos de hidrógeno y forman un núcleo de deuterio. En el central se unen un núcleo de deuterio y otro de hidrógeno para formar un isótopo del helio. Debajo se fusionan dos núcleos de este isótopo formando un helio normal de número másico 4.

* La obra de Steven Weinberg "Los tres primeros minutos del Universo", publicada en Biblioteca Científica Salvat, estudia la historia de la materia con la cual se formó la primera generación de estrellas.

al mismo tiempo tres núcleos de helio. La transformación es mucho más fácil siguiendo los dos pasos representados en la figura 3-4: dos núcleos de helio chocan y forman un átomo del elemento berilio de número másico 8. Este tipo de berilio es muy radiactivo, y el núcleo de berilio producido existe durante un tiempo increíblemente breve. Al cabo de una diezmilbillonésima de segundo se desintegra de nuevo dando los dos núcleos de helio de partida. Pero si durante su brevísima vida choca con un tercer átomo de helio, se forma un átomo de carbono bueno y estable. Casi siempre los núcleos de berilio se desintegran de nuevo y es muy raro que un átomo errante de helio lo salve de la desintegración. Pero en la materia estelar a 100 millones de grados, el número de transformaciones de este tipo es tan alto que la energía que liberan puede calentar las estrellas.

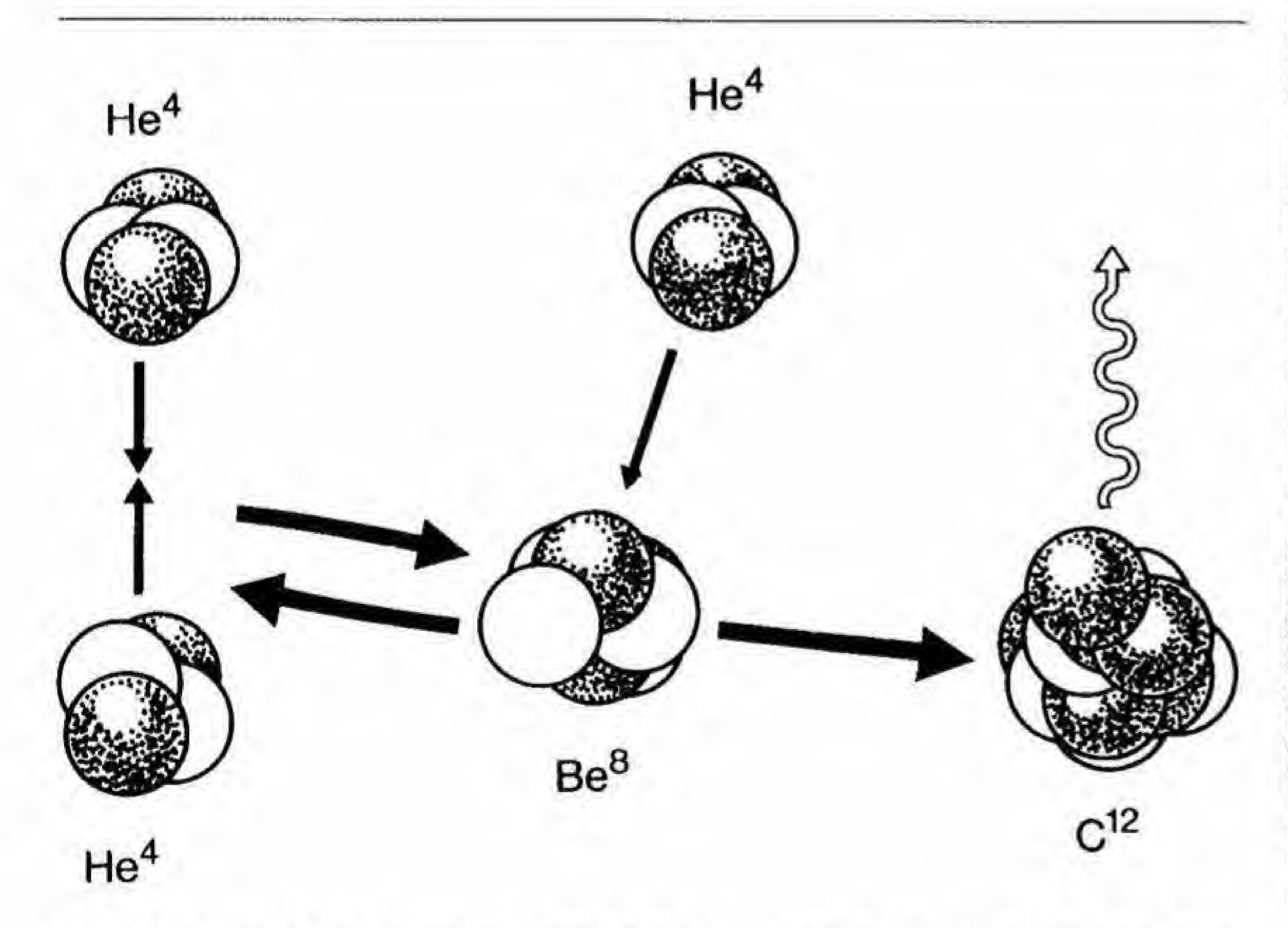


Fig. 3-4. Fusión del helio y formación del carbono. Dos núcleos de helio se fusionan formando un núcleo de berilio muy radiactivo que rápidamente se transforma de nuevo en los dos núcleos originales de helio. Pero si durante su corta vida choca con él otro núcleo de helio, el núcleo de berilio se transforma en carbono y emite radiación.

¿Cómo continúa el proceso? Si las temperaturas son algo mayores, los átomos de carbono se unen y se desintegran de maneras muy distintas, dando elementos como el magnesio, el sodio, el neón y el oxígeno. Los átomos de oxígeno pueden unirse y formar átomos de azufre y de fósforo. De este modo, se forman núcleos atómicos cada vez más pesados, y uno puede preguntarse si todos los elementos químicos presentes en el interior de las estrellas proceden en último extremo de la unión de átomos de hidrógeno y de helio. En el capítulo 11 volveremos a tratar este problema.

De momento nos basta saber que en el interior de las estrellas tienen lugar reacciones nucleares y que la fusión del hidrógeno y su conversión en helio, en las condiciones que imaginamos en el interior de las estrellas, puede cubrir las enormes necesidades de energía de estos astros en períodos prolongados de tiempo.

Pero ¿cómo son realmente las condiciones en el interior de las estrellas? ¿Cómo podemos conocer las temperaturas del interior de un cuerpo que nadie puede ver y del cual no nos llega ninguna información directa? El hombre está muy bien informado sobre los procesos del interior de las estrellas, mejor informado que sobre el interior de la Tierra, y en el siguiente capítulo contaré esta historia y explicaré el papel importante que juegan en ella los modernos computadores.

IV. ESTRELLAS Y MODELOS ESTELARES

Afortunadamente existe una posibilidad de observar el interior de las estrellas y de obtener datos sobre él. Las estrellas no son objetos maravillosos a los que sólo podamos mirar para mostrarles reverencia. Son objetos reales de nuestro Universo y, como tales, están sometidos a las leyes de la física. Ya recurrimos a ellas cuando aplicamos a las estrellas la ley de la conservación de la energía, sin citarla explícitamente, para calcular el tiempo que puede vivir una estrella de su energía nuclear. Pero en las estrellas no sólo se ha de cumplir la ley de la energía, sino todas las demás leyes físicas, al igual que en cualquier otro lugar del Universo.

Quiero explicar ahora en esbozo cómo las leyes físicas y las propiedades conocidas de la materia estelar determinan la estructura total de una estrella, de modo que recurriendo a un computador podemos hacernos una cierta idea del interior de las estrellas. Con estrellas sencillas basta fijar la cantidad y la composición química de sus masas gaseosas; entonces, sin necesidad de ver ninguna estrella de este tipo en el cielo, puede determinarse inequívocamente su entera estructura solucionando ecuaciones sobre la mesa de trabajo. No sólo puede calcularse su temperatura superficial y su luminosidad y así representar a la estrella por un punto en el diagrama HR, sino que también pueden conocerse datos más interesantes como la presión, la temperatura y la densidad en cualquier punto de su interior. El lector que considere excesivos estos detalles puede saltarse las páginas siguientes y continuar la lectura en la sección "Un modelo de Sol primitivo" de la página 63. Allí suponemos almacenadas ya en un gran programa de computador las leyes físicas y las propiedades materiales de las estrellas que vamos a describir ahora con mayor detalle; luego experimentaremos con este programa.

GRAVEDAD Y PRESIÓN GASEOSA

Las estrellas han de estar en equilibrio, excepto en breves intervalos. El peso de la materia estelar que descansa sobre las capas inferiores y la presión del gas estelar han de compensarse mutuamente. Si no hubiera presión gaseosa, toda la materia se precipitaría hacia el centro de la estrella. Si no hubiera gravedad, la presión gaseosa proyectaría toda la materia al espacio. En una estrella la situación ha de haber evolucionado hasta equilibrar ambas acciones en todos los puntos. Esta condición de equilibrio ayuda a calcular la presión gaseosa en cualquier punto de la estrella. Hemos visto ya que Eddington utilizó esta condición para evaluar la presión en el centro del Sol y derivar de ella un valor para la temperatura de 40 millones de grados. Para poder obtener este resultado hay que saber algo más sobre el gas de que están formadas las estrellas.

La materia constitutiva de las estrellas no es ninguna sustancia maravillosa y secreta; consta de materiales que conocemos también en la Tierra. Las propiedades del hidrógeno y del helio, los componentes principales de las estrellas, así como las propiedades de los demás elementos químicos se han investigado desde hace tiempo en los laboratorios terrestres. Es imposible, desde luego, conseguir en la Tierra que los materiales alcancen temperaturas suficientemente elevadas con las densidades que dominan en el interior de las estrellas; sin embargo, nuestros conocimientos son suficientes para evaluar las propiedades de la materia en el interior de las estrellas. Nos ayuda a ello una circunstancia afortunada. Estamos acostumbrados en la Tierra a que los gases tengan densidades reducidas. Si comprimimos el aire de la atmósfera terrestre o cualquier otro gas hasta darle la densidad del agua o una densidad superior, la presión varía de modo complicado. El gas puede licuarse o solidificarse, complicando todavía más la cosa. Esto explica que nadie conozca exactamente las propiedades de la materia en el centro de la Tierra, y que sepamos tan pocas cosas sobre el centro de la Tierra. Al someter la materia a una fuerte compresión, los átomos se aproximan mucho y sus envolturas atómicas se perturban mutuamente. Hasta ahora no se ha podido calcular de modo completo el curso detallado de estas interacciones de las envolturas de átomos distintos.

En las estrellas todo es distinto. Allí dominan las altas temperaturas. Si la materia está muy comprimida, también está tan caliente que los átomos han perdido desde hace tiempo sus envolturas electrónicas. La ligazón entre los electrones y los núcleos atómicos ha desaparecido, y los núcleos y los electrones vuelan libres. Las partículas necesitan ahora mucho menos espacio que el átomo de hidrógeno eléctricamente neutro, formado por ellas. La materia estelar caliente se comporta pues como un gas enrarecido, incluso cuando su densidad es tan elevada que en un centímetro cúbico hay cien gramos y más de materia. Debemos a esta circunstancia que sepamos más cosas sobre el centro del Sol que sobre el centro de la Tierra. Y aunque aumente todavía más la densidad en las estrellas, las propiedades del gas continúan siendo bien conocidas, gracias de nuevo a las altas temperaturas. Las propiedades de la materia sólo se complican cuando la materia estelar se enfría y los átomos se ordenan en forma de cristales. Pero esto sólo tiene importancia en unas pocas estrellas, principalmente en las enanas negras de temperatura baja.

GENERACIÓN Y TRANSPORTE DE ENERGÍA

En el centro de las estrellas las temperaturas son tan altas, que permiten el desarrollo de reacciones nucleares y la liberación de energía nuclear. Si Atkinson y Houtermans, Bethe y von Weizsäcker demostraron en los años veinte y treinta cómo reaccionan entre sí los núcleos atómicos en las estrellas, otros físicos nucleares nos proporcionaron más tarde toda la información necesaria para calcular la cantidad de energía que un gramo de materia estelar libera a una densidad y una temperatura dadas mediante las reacciones nucleares.

La región central de una estrella caliente genera energía. Esta energía ha de escapar hacia fuera. Es decir, que debe atravesar la envoltura exterior de la estrella. En general lo hace por radiación. Por tanto, una característica importante de la materia estelar es su transparencia a la radiación luminosa y térmica. Pero en las capas exteriores de las estrellas, donde los átomos no se han liberado todavía plenamente de su envoltura electrónica, los cuantos de luz de la radiación procedente del interior son absorbidos por las envolturas de los átomos en reposo; los átomos los absorben y al cabo de un rato los reemiten. Los cuantos de la radiación procedente del interior saltan de átomo en átomo, se absorben, se emiten, se desvían y tras superar muchos obstáculos y dar muchos rodeos llegan a la superficie, de donde pueden salir ya sin más impedimentos. La

transparencia de la materia estelar es pues de gran importancia para la estructura de toda la estrella. Hay que llevar a cabo cálculos complicados para determinarla. El astrofísico tiene la ventaja de que los físicos atómicos se han ocupado ya de este trabajo, porque las propiedades absorbentes de los átomos son también importantes en otros campos.

Después de la última guerra llegó una ayuda inesperada de un campo totalmente diferente. Al explotar una bomba atómica se genera en su centro una radiación luminosa y térmica muy intensa que los átomos de las masas de aire vecinas absorben y reemiten. Los especialistas en bombas tuvieron que estudiar de modo exacto la transparencia de los gases a la radiación luminosa y térmica para poder predecir la eficacia de una bomba antes de explotar.

A pesar del secreto oficial pudieron publicarse resultados parciales de los cálculos efectuados, y los astrofísicos pueden referirse a ellos. En el centro de investigación atómica de Los Álamos, en EE.UU., hay todo un grupo de científicos cuyo trabajo es puramente astrofísico. Científicos de oriente y occidente utilizan en armonía y con mucho éxito las tablas calculadas allí, que dan las transparencias de la materia estelar en función de densidades y temperaturas distintas. La armonía entre oriente y occidente se expresa por ejemplo en el hecho de que los investigadores de Los Álamos hayan publicado parte de las tablas que ellos calcularon en una revista de la Academia Soviética de Ciencias.

MATERIA ESTELAR EN EBULLICIÓN

A veces la radiación que se abre camino hacia el exterior de una estrella es tan intensa, y la transparencia de la materia estelar tan mala, que la energía se almacena en el interior de la estrella. En este caso, la estrella utiliza otro recurso para sacar su energía al exterior. Conocemos este mismo proceso en la Tierra. Cuando la placa de una cocina se calienta, emite parte de su energía al espacio; pero también entra en acción otro tipo de transporte de energía. El aire situado encima de la placa se calienta, se dilata, pierde densidad y se eleva, dejando su lugar a masas más frías de aire. El aire calentado transporta energía de la placa a otros puntos de la habitación. Decimos que el aire transporta energía por *convección*. Cuando calentamos una habitación con una estufa le transportamos energía mediante radiación y convección. Sobre un fuego abierto,



Fig. 4-1. Granulación de la superficie solar. En las capas exteriores del Sol la energía procedente del interior se transporta por convección, mediante la subida hasta la superficie solar de globos gaseosos calientes y más brillantes, mientras que se hunden hacia dentro masas gaseosas más frías (en la fotografía más oscuras). Un intervalo igual al diámetro de la Tierra ocuparía en la fotografía una longitud de 14 mm. (Fotografía: D. Soltau con el reflector de vacío de 40 cm del Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik [Friburgo] en Izana [Tenerife].)

sobre el asfaltado de una calle calentada por el Sol, se elevan masas de gas caliente que transportan el calor hacia arriba; masas de gas más frío descienden desde arriba, se calientan y al cabo de un tiempo también suben. La convección juega un importante papel en el equilibrio energético de la atmósfera terrestre; por ello los meteorólogos la estudiaron antes que los astrofísicos.

En muchas estrellas la materia efectúa movimientos de borboteo cuando la radiación resulta insuficiente y la convección ha de encargarse de transportar parte de la energía. En las capas exteriores de nuestro Sol la energía no se transporta por radiación, sino que sale hacia fuera en forma de globos de gas caliente. Bastan pequeños telescopios para observar el gas hirviente del Sol, si se amortigua la intensa luz con un fuerte filtro. La superficie solar no es uniformemente luminosa, sino que vemos ascender globos calientes y claros de unos 1.000 kilómetros de diámetro junto a masas de gas frías y oscuras que descienden. La figura 4-1 presenta una instantánea de la superficie solar con su estructura de manchas en perpetuo cambio que los astrónomos llaman *granulación*. Demuestra que la convección tan conocida en la Tierra también puede tener importancia en las estrellas.

ESTRELLAS EN EL COMPUTADOR

Sólo he citado algunos ejemplos de las leyes y propiedades materiales que conocemos y que nos ayudan a comprender la estructura interior de una estrella. Con todos estos conocimientos, existentes ya en su mayoría antes de la II Guerra Mundial, puede intentarse calcular directamente sobre el pupitre la estructura de una estrella. El primero en hacerlo fue el profesor de termodinámica de la Escuela Técnica Superior de Munich, Robert Emden. Su libro "Esferas de gas", publicado en 1907, se convirtió en el clásico de la teoría de la estructura estelar. Le siguieron, en Inglaterra, Arthur Eddington y más tarde Thomas Cowling y Subrahmanyan Chandrasekhar, quienes en los años veinte y treinta construyeron "modelos estelares" que permitieron sacar conclusiones aproximadas sobre el interior de las estrellas.

El desarrollo de los modernos computadores ha permitido plantearse de nuevo el problema y simular en cierto modo una estrella con un computador. ¿Qué significa esto? Se enseñan a los computadores electrónicos las leyes que determinan la estructura de una estrella. Se almacena en las máquinas información sobre las propiedades de la materia estelar, es decir, se introducen datos como la presión del gas estelar en función de todas las densidades y temperaturas previsibles. Se programan las leyes por las cuales el hidrógeno de la materia estelar se transforma en helio y la cantidad de energía que liberan estos procesos. Se enseña al computador el camino que la energía liberada en el interior de la estrella sigue para alcanzar a través de la materia estelar la superficie de la estrella, distinguiendo entre el transporte por radiación y el transporte por convección. Todas estas informaciones separadas se reúnen en un gran programa de computador.

Actualmente pueden reconstruirse las estrellas en el computador y seguir teóricamente su desarrollo. El computador imprime largas listas con la temperatura, la densidad, la presión gaseosa y la intensidad del flujo de energía dirigido hacia fuera en cada una de las distintas capas de la estrella. Una tal lista describe la estructura de una estrella en un momento determinado; decimos que el computador nos ha proporcionado un *modelo de la estrella*.

UN MODELO DEL SOL PRIMITIVO

Imaginemos que disponemos de un programa así y que contamos con un computador de suficiente potencia. Vamos ahora a construir modelos estelares. Primero tenemos que decidir la composición química que atribuimos a la materia estelar. Aceptemos la mezcla de elementos químicos que observamos en el Sol y que encontramos también en casi todas las estrellas. Supongamos, pues, que en un kilogramo de materia estelar hay 700 gramos de hidrógeno y 270 gramos de helio y que los restantes elementos pesados, especialmente el carbono y el oxígeno, se reparten en los treinta gramos restantes. El computador ha de calcular ahora con precisión las propiedades materiales de la estrella, especialmente la transparencia de su material a la radiación para esta mezcla química. Ahora al computador sólo le falta conocer la cantidad de materia que queremos introducir en nuestro modelo estelar. Tomemos, por ejemplo, la cantidad de materia que hay en el Sol. Entonces la máquina, con ayuda de las leyes naturales incluidas en el programa y de las propiedades materiales que conoce, nos calcula un modelo estelar. Hoy en día los computadores son tan rápidos que nos entregan en pocos minutos el resultado de estos cálculos. El modelo estelar que

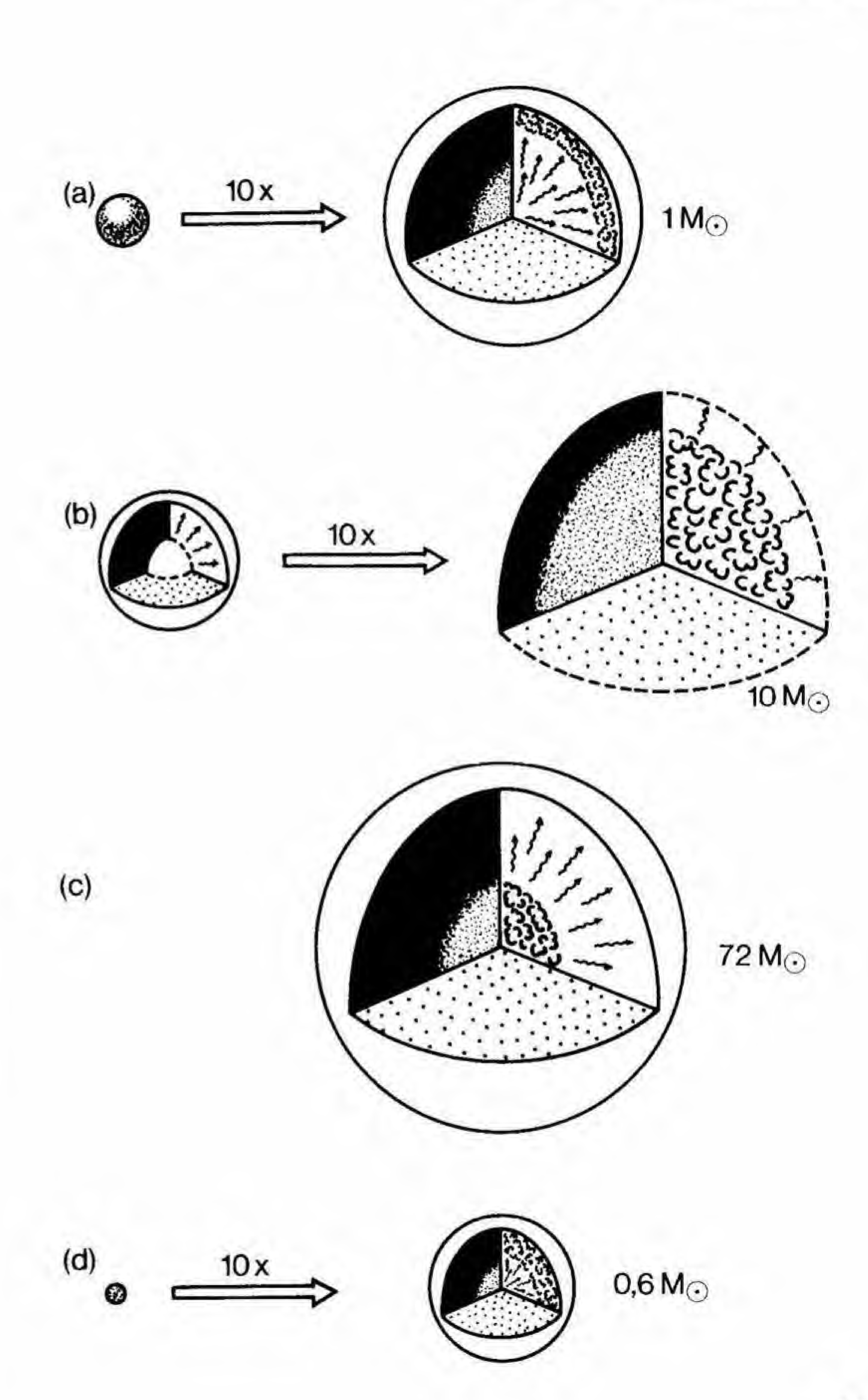
obtenemos con los datos del Sol resulta algo más pequeño que nuestro Sol real, pues su diámetro es sólo un 92 % del diámetro solar, y emite menos energía de la esperada: su luminosidad es sólo el 75 % de la del Sol real. La temperatura superficial es de 5.620 grados, o sea, unos 180 grados más baja. No nos preocuparemos de momento por estas discrepancias, y vamos a estudiar con mayor detalle el modelo estelar. En el diagrama HR está situado dentro de la secuencia principal, algo por debajo del Sol real.

La figura 4-2 (a) representa el interior de nuestro modelo solar*. Volveremos a utilizar a menudo en este libro la representación utilizada aquí. El pie de la figura la explica detalladamente.

La materia de nuestro modelo tiene en su centro una densidad de 100 gramos por centímetro cúbico, o sea, que es unas trece veces más densa que el hierro sólido. La presión se eleva a 130.000 millones de atmósferas. La temperatura en la zona central es de 10 millones de grados. Esta temperatura permite que se desarrollen reacciones nucleares: la cadena protón-protón genera energía nuclear. Tenemos pues una estrella que brilla gracias a la fusión del hidrógeno. La energía en las zonas interiores se transporta hacia el exterior por radiación, pero en las capas exteriores este mecanismo de transporte no basta. La convección se encarga de llevar la energía hasta

Fig. 4-2. Estructura interna de modelos estelares de distinta masa. La masa está ▶ expresada en unidades de masa solar $M_\odot$. En los dibujos parciales (a), (b), (d) cada estrella está dibujada a la izquierda a la misma escala. También el dibujo parcial (c) está a la misma escala. En (a) y (d) los modelos estelares están representados también a escala diez veces mayor para mostrar más claramente la estructura interna; en el dibujo parcial (b) sólo se ha ampliado la zona interior que queda en blanco a la izquierda. Los tres sectores representan composición química (abajo), generación de energía (arriba a la izquierda) y transporte de energía (arriba a la derecha). Los puntos del sector inferior muestran las regiones en las que los elementos químicos conservan las proporciones originales. Vemos que domina todavía en todos los modelos la mezcla original rica en hidrógeno. Las regiones brillantes del sector superior izquierdo muestran dónde las reacciones nucleares liberan energía. Las flechas onduladas del sector superior derecho muestran dónde se transporta energía al exterior mediante radiación, zonas nebulosas o convección.

* He aplicado el modelo de los valores numéricos que Kurt von Sengbusch obtuvo en su tesis presentada en Gotinga en 1967, a pesar de que muchos otros astrofísicos han calculado modelos solares antes y después de él. También utilizaré sus resultados más tarde, cuando describa la historia evolutiva del Sol.



la superficie. Masas de gas suben y se hunden, exactamente como se observa en la granulación de la superficie del Sol.

Resumiendo: Con materia de la misma composición química que el Sol y con una masa igual hemos construido una estrella y hemos obtenido un objeto situado en la secuencia principal del diagrama HR, que quema en su interior hidrógeno convirtiéndolo en helio, que en sus capas exteriores es convectivo como el Sol y que se parece al Sol en sus propiedades concretas.

Pero, ¿por qué no hemos obtenido exactamente un astro como el Sol? ¿A qué se deben las diferencias? ¿Tiene nuestro programa algún error? Como veremos, las diferencias con el Sol real se deben a que hemos dado a la materia de nuestro Sol una composición química unitaria. El Sol real brilla desde hace mucho más de tres mil millones de años, y su zona central debe de haberse enriquecido desde hace tiempo en helio de nueva formación. No tuvimos en cuenta este hecho en nuestro modelo. Construimos un Sol e imaginamos que su centro tendría la misma composición química que sus capas exteriores. Construimos pues un Sol que acababa de iniciar su combustión nuclear, un Sol situado al principio de su vida. Construimos un *Sol primitivo*. Antes de ver cómo pasamos del Sol primitivo al Sol de hoy, queremos llevar a cabo el mismo experimento de cálculo con estrellas de masa distinta y de composición química igual.

DESCUBRIMOS LA SECUENCIA PRINCIPAL PRIMITIVA

Tomemos pues materia de composición química igual a la del Sol; pero ahora exigimos al computador que nos construya un modelo estelar cuya masa sea el doble de la del Sol. En menos de un minuto el computador nos imprime la lista correspondiente al nuevo modelo. La estrella que este modelo describe vive también de la fusión del hidrógeno. Podemos, por tanto, imaginar una serie entera de masas y obtener por cálculo los correspondientes modelos estelares. ¿Qué descubrimos? Todas las estrellas se alimentan de la fusión del hidrógeno. Pero si bien las estrellas de masa igual o inferior a la del Sol sacan su energía de la cadena protón-protón, las estrellas de más masa transforman el hidrógeno en helio mediante el ciclo del carbono.

El computador nos da también para cada modelo estelar la correspondiente luminosidad y temperatura superficial. Esto nos

permite situar en el diagrama HR nuestros modelos de estrellas que queman hidrógeno (véase fig. 4-3). Observemos que todos están situados sobre una línea que baja de la izquierda a la derecha: las estrellas de gran masa están arriba, las de poca masa abajo. Hemos descubierto de nuevo la secuencia principal, pero ahora sin observar las estrellas; la hemos encontrado en las listas del computador referentes a estrellas de masas distintas que queman hidrógeno. Antes, basándonos en la duración de la vida del Sol y de las restantes estrellas de la secuencia principal, habíamos supuesto que estas es-

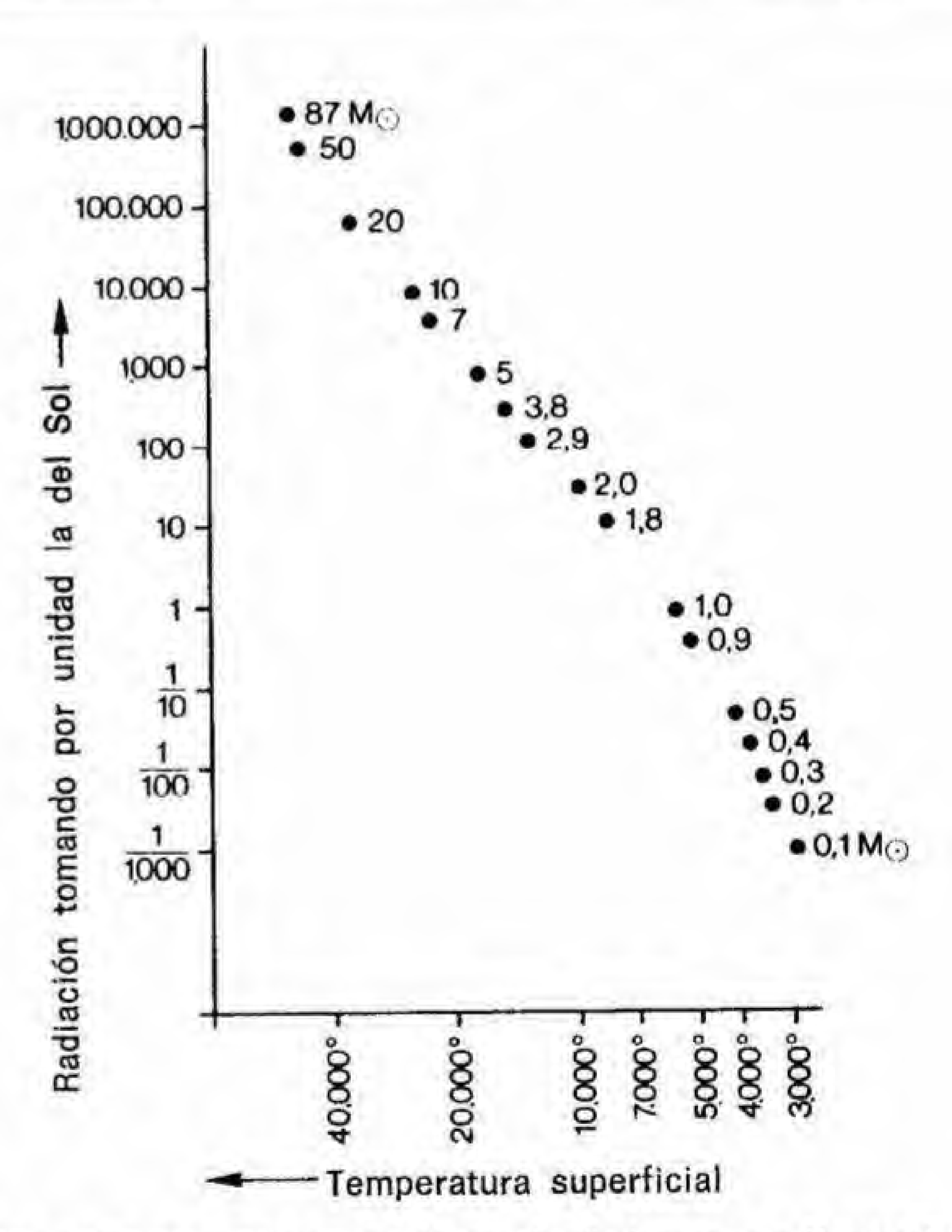


Fig. 4-3. Una serie de modelos estelares de distinta masa (formados todos por la misma mezcla química rica en hidrógeno) traza en el digrama HR una secuencia principal con todas las propiedades de la secuencia principal observada. Las masas de cada modelo están expresadas en unidades de masa solar ($M_\odot$). Puede observarse que la radiación de las estrellas de la secuencia principal crece mucho al aumentar la masa.

trellas cubrían sus necesidades de energía fusionando hidrógeno, pero ahora esta suposición se ha convertido en certeza. La secuencia principal es el lugar que ocupan en el diagrama HR las estrellas que se alimentan con la energía nuclear del hidrógeno.

Los modelos estelares teóricos reproducen también otra característica de las estrellas de la secuencia principal que ya hemos citado anteriormente: la relación observada entre masa y luminosidad. Si construimos un modelo estelar para diez masas solares, su luminosidad es mucho mayor que la de un modelo con una masa solar, y este aumento de la luminosidad con la masa del modelo estelar se corresponde bien con la relación observada entre masa y luminosidad representada en la figura 2-4.

En todos los modelos estelares obtenidos de este modo se cumple lo que ya dijimos en relación al Sol. Los modelos representan las estrellas en el momento en que empieza la fusión del hidrógeno. Son las *estrellas primitivas.* Por tanto, la secuencia principal construida a partir de ellos no es la de las estrellas observadas en el cielo, sino la secuencia principal de las estrellas primitivas, la *secuencia principal primitiva.* Sin embargo, las estrellas no cambian mucho, siempre que no estén en una situación clara de agotamiento; por tanto, la secuencia principal primitiva no se distingue mucho de la secuencia principal observada.

Los modelos estelares presentan una buena concordancia con el aspecto exterior de las estrellas reales, por lo que cabe esperar que también el interior esté bien representado por los modelos calculados por computador. El cálculo de modelos nos permite echar una ojeada al interior profundo de las estrellas, algo que queda fuera del alcance de la astronomía de observación. Ya lo hemos hecho en el caso del Sol; vamos a observar ahora el interior de dos estrellas más, una de gran masa y otra de pequeña masa.

EL INTERIOR DE LA ESTRELLA SPICA

Tomemos como ejemplo de una estrella de gran masa un cuerpo formado por diez masas solares. Puesto que Spica tiene también unas diez masas solares, el modelo de computador debería reproducir las características de Spica. De hecho la temperatura superficial y la luminosidad del modelo se corresponden bien con los valores de Spica. ¿Qué aspecto presenta el interior del modelo estelar? La temperatura central es de 28 millones de grados. La energía que se libera en el centro proviene del ciclo del carbono. La luminosidad se genera en una esfera cuyo diámetro es cinco veces inferior al de la estrella entera. Este centro genera tanta energía que la radiación no consigue transportarla toda hacia fuera, y debe intervenir también la convección: el 22 % más interior de la masa de la estrella se encuentra en un estado convectivo (véase fig. 4-2 [b]). Fuera de esta región la energía se transporta por radiación. Los cuantos de luz que se abren paso hacia fuera son retenidos y desviados continuamente por los átomos y por los electrones que encuentran a su paso, hasta que finalmente alcanzan la superficie y determinan allí la luminosidad de la estrella. La densidad en el centro es algo inferior a los 8 gramos por centímetro cúbico. Por tanto, la materia estelar, que continúa en estado gaseoso, tiene allí la densidad del hierro sólido. La presión que ejerce la masa estelar por su propio peso sobre su centro es de 35.000 millones de atmósferas. Este aspecto presenta pues el interior de Spica, la estrella más brillante de Virgo.

Todas las estrellas que tienen bastante más masa que el Sol transportan, como Spica, la energía de su zona central mediante convección. Puede comprobarse esto también en el modelo de una estrella de 72 masas solares representado en la figura 4-2 (c).

Hemos discutido ya el modelo del Sol primitivo. Veamos ahora una estrella de bastante menos masa que el Sol.

LA ENANA ROJA DEL CISNE

En la constelación del Cisne hay una estrella que todos los astrónomos conocen perfectamente: 61 Cygni. Se hizo famosa porque sirvió a Friedrich Wilhelm Bessel, a quien ya conocemos por la historia del descubrimiento de la compañera de Sirio, para ensayar por primera vez entre 1837 y 1838 un nuevo método de determinación de distancias (véase el Apéndice B).

La estrella 61 Cygni es en realidad un sistema estelar doble: dos estrellas, una de media masa solar y la otra de 0,6 masas solares, dan una vuelta cada 720 años alrededor de su centro de gravedad común. Aquí nos interesa la estrella de mayor masa, 61 Cygni A. Es una estrella de la secuencia principal con una temperatura superficial de 4.000 grados. Es más pequeña y bastante más fría que el Sol y por ello se cuenta entre las estrellas rojas: es una *enana roja.*

Si construimos en el computador un modelo estelar para 0,6 masas solares, tendrá aproximadamente las mismas características

externas que 61 Cygni A, y estará situado en el mismo lugar del diagrama HR. ¿Cómo es el interior de esta enana roja? Hemos representado el modelo en la figura 4-2 (d). La temperatura en su centro es de sólo 8 millones de grados. Todas las reacciones nucleares se producen allí según la cadena protón-protón. La densidad central de la estrella, 65 gramos por centímetro cúbico, es inferior a la del centro del Sol. La presión central, de 75.000 millones de atmósferas, es parecida a la de Spica. La energía de su interior se transporta por radiación. La parte exterior presenta convección como en el Sol; sin embargo, la zona convectiva es bastante más gruesa. Las zonas convectivas exteriores de gran grosor son típicas de las estrellas rojas.

Cuanto más se baja por la secuencia principal hacia estrellas enanas más frías, y por tanto más rojas, más gruesa resulta la zona exterior de convección. Si la estrella está formada únicamente por unas cuantas décimas partes de la masa del Sol, toda la materia, desde la superficie hasta el mismo centro, está en movimiento convectivo.

PROPIEDADES DE LA SECUENCIA PRINCIPAL PRIMITIVA

Ahora ya comprendemos *grosso modo* las propiedades de la secuencia principal. Con esto hemos conseguido mucho, porque más del 90 % de las estrellas pertenecen a ella. Sabemos ya que todas viven de la fusión del hidrógeno y de su conversión en helio. Las propiedades del átomo de hidrógeno determinan el equilibrio energético y por tanto determinan también las propiedades exteriores de las estrellas de la secuencia principal. Entre estas propiedades están el color y el brillo, propiedades que podemos percibir nosotros mismos en el cielo nocturno a simple vista, por lo que podemos decir con razón que las estrellas nos ofrecen proyectadas en el cielo las propiedades del átomo de hidrógeno. Si este átomo tuviera propiedades distintas, las estrellas tendrían otro aspecto.

¿Hasta dónde llega la secuencia principal? ¿Puede la naturaleza construir una estrella que viva de la fusión del hidrógeno partiendo de una cantidad dada y arbitraria de materia rica en hidrógeno? ¿Hasta qué nivel de las masas pequeñas se extiende la secuencia principal? ¿Pueden existir estrellas con una masa igual a la de una persona?

Cuando se construyen con un computador estrellas de masa

cada vez más pequeña, por debajo de una masa solar, la temperatura central de los correspondientes modelos es cada vez más baja. Pronto la cadena protón-protón ya no funciona plenamente. A menudo falla la última reacción, la fusión de dos núcleos de He^3, y ya no es posible transformar el hidrógeno en He^4. Si bajamos hasta unas ocho centésimas de la masa solar, ya no obtenemos estrellas capaces de quemar hidrógeno. La temperatura de su interior resulta insuficiente para fusionar los núcleos de hidrógeno. Es decir, que las estrellas de la secuencia principal, las estrellas que viven de la fusión del hidrógeno, llegan sólo hasta un nivel algo inferior a una décima parte de la masa solar. Allí finaliza la secuencia principal. Si pedimos al computador que construya modelos de estrellas basadas en el hidrógeno y de masa inferior a la indicada, deja de obedecernos. Si lleváramos a cabo un gigantesco experimento espacial para formar una estrella con una milésima parte de la masa del Sol, obtendríamos un astro que podría ser cualquier cosa, quizás algo parecido a un planeta, pero que no sería nunca una miniestrella capaz de quemar hidrógeno.

¿Qué podemos decir ahora sobre el otro extremo de la secuencia principal, el de las grandes masas? ¿Qué sucede cuando encargamos a un computador que construya estrellas de cien, de mil, de un millón de masas solares? Con estas masas gigantescas el computador proporciona auténticos modelos estelares. Pero las estrellas tienen ahora una notable propiedad: si se las comprime ligeramente durante un tiempo breve, la densidad de su zona central aumenta notablemente, y la temperatura también sube. Este calentamiento estimula de tal modo la fusión del hidrógeno, basada en estas estrellas en el ciclo del carbono, que la energía liberada impulsa de nuevo hacia fuera con gran ímpetu la materia estelar. A continuación, la zona central se enfría notablemente, la producción de energía nuclear disminuye, la presión gaseosa baja y la fuerza de la gravedad vuelve a atraer la materia en expansión. Estas masas, al caer de nuevo hacia dentro, comprimen otra vez la zona central y el juego se repite.

Cálculos más exactos de este proceso, como los efectuados por el astrónomo Immo Appenzeller, actualmente en Heidelberg, demuestran que estas oscilaciones se refuerzan hasta tal punto que las expansiones proyectan hacia el espacio una pequeña parte de las capas externas de la estrella con tal velocidad que ya no vuelven a caer hacia ella. Cada oscilación hace perder masa a la estrella, y el proceso continúa hasta que nuestra superestrella sólo disponga de

unas 90 masas solares. Entonces se interrumpe el círculo vicioso. La zona central de la estrella ya no se calienta tanto con la compresión, los procesos nucleares ya no responden con una intensa superproducción y la oscilación no se refuerza. La estrella se ha convertido en un miembro decente de la secuencia principal, de 90 masas solares, que quema tranquilamente su hidrógeno.

Podríamos pensar que todo este proceso se desencadena únicamente cuando alguien comprime nuestra superestrella, porque es en este momento cuando se inician los ciclos crecientes de expansión y compresión. Aunque, por fortuna, en el Cosmos no hay nadie que se dedique a comprimir estrellas, conviene recordar que basta la menor presión, la menor desviación del equilibrio, para poner en marcha las oscilaciones. El Universo está siempre lleno de perturbaciones. Si nadie ejerce una influencia sobre la estrella desde el exterior, bastan los movimientos de sus átomos en el interior, el movimiento de su materia en las zonas donde la energía se transporta al exterior por convección, para provocar las oscilaciones y mantenerlas el tiempo necesario hasta que la estrella pierda la masa sobrante.

Encontramos así un límite superior natural de la secuencia principal de nuestros modelos estelares. También esto concuerda muy bien con la observación. Nadie ha encontrado todavía una estrella de masa superior al límite máximo previsto teóricamente.

Nuestros modelos de computador nos han dado hasta ahora un buen resultado. Pero sólo describen estrellas primitivas, estrellas que apenas empiezan a vivir. Pronto el hidrógeno de sus zonas centrales empezará a disminuir: lo hará con mayor rapidez en las estrellas de gran masa, y al cabo de un tiempo suficiente en las de masa menor. Las estrellas envejecen. En el siguiente capítulo estudiaremos este proceso con el modelo del Sol.

V. LA HISTORIA DEL SOL

El helio es la ceniza de la combustión del hidrógeno. Mientras el Sol primitivo emite desde su superficie energía al Cosmos, en su interior se forma helio a partir del hidrógeno. A medida que pasa el tiempo, el Sol va gastando su hidrógeno. En nuestro modelo habíamos imaginado el Sol primitivo compuesto uniformemente de materia rica en hidrógeno. Ahora, sin embargo, la región central de nuestra estrella solar se está enriqueciendo con helio de nueva formación. El modelo que nos proporcionó el computador pronto dejará de ser correcto.

DEL SOL PRIMITIVO AL SOL ACTUAL

Cuando se construye un modelo para una estrella de la secuencia principal, se sabe la cantidad de energía que la fusión del hidrógeno genera en cada punto de su región central. También se calcula cuánto helio se forma allí por segundo. En el centro del Sol primitivo se forma durante un año en cada kilogramo de materia una diezmillonésima de gramo de helio. Por tanto, si calculamos cuanto helio se ha formado en cada punto de la estrella al cabo de un millón de años, sabremos la composición química de un modelo solar que describe nuestro Sol un millón de años después del inicio de la fusión del hidrógeno.

Ahora el computador ha de calcular un nuevo modelo estelar con una composición química de la región central de la estrella algo diferente; porque al aumentar la proporción de helio, las propiedades del material estelar se han modificado ligeramente. Ha cambia-

do la transparencia a la radiación, y las reacciones nucleares no disponen ya de tanto hidrógeno como en el Sol primitivo. El modelo estelar calculado con los nuevos datos describe el estado del Sol un millón de años después del inicio de las reacciones nucleares. Se diferencia poco del Sol primitivo, porque un millón de años no son nada en comparación con los miles de millones de años que puede durar el Sol con su combustible. La temperatura superficial del nuevo modelo es casi la misma que la del Sol primitivo, sólo su luminosidad es algo superior. El centro dispone ahora de menos hidrógeno, pero su temperatura ha aumentado algo en el nuevo modelo y, por tanto, genera más energía que antes.

El nuevo modelo estelar nos dice también dónde se libera energía y cuánto hidrógeno se transmuta allí por segundo. También podemos determinar, de nuevo, cuál será la composición química un millón de años después. Y con esta nueva mezcla de elementos químicos podemos encargar al computador que construya un nuevo modelo estelar.

Podemos, de este modo, ir juntando modelos solares. Cada modelo estelar nos da la temperatura superficial y la luminosidad correspondientes, o sea, que los modelos pueden dibujarse uno tras otro en el diagrama HR. Aparece así en el diagrama una cadena de puntos a partir del Sol primitivo que describen el desplazamiento del Sol en el transcurso de su desarrollo a través del diagrama HR. Obtenemos la *trayectoria evolutiva* del Sol. La figura 5-1 representa esta trayectoria e indica el tiempo transcurrido en varios puntos desde el inicio de la fusión del hidrógeno.

La trayectoria evolutiva de nuestro Sol programado pasa por el punto del diagrama donde está situado hoy en día el Sol. Se confirma, así, lo dicho en la sección dedicada al modelo del Sol primitivo: la diferencia de propiedades entre el Sol primitivo y el Sol actual es un efecto evolutivo. Cuando la zona central se ha enriquecido en helio, nuestro modelo solar presenta las propiedades del Sol actual. Esto nos hace pensar que nuestros cálculos solares son correctos. Y así nos enteramos de la edad del Sol real. La cadena de modelos estelares desde el Sol primitivo hasta el Sol actual salva un intervalo temporal de 4.500 millones de años. Ésta es la edad de nuestro Sol. Éste es el tiempo que ha debido transcurrir para que el Sol primitivo se transforme en el Sol actual. Antes de seguir adelante y de plantearnos el futuro, vamos a estudiar un poco más nuestro Sol actual.

Podemos aprovechar la oportunidad y echar una ojeada al interior del Sol con ayuda del Sol programado. La figura 5-2 (b) re-

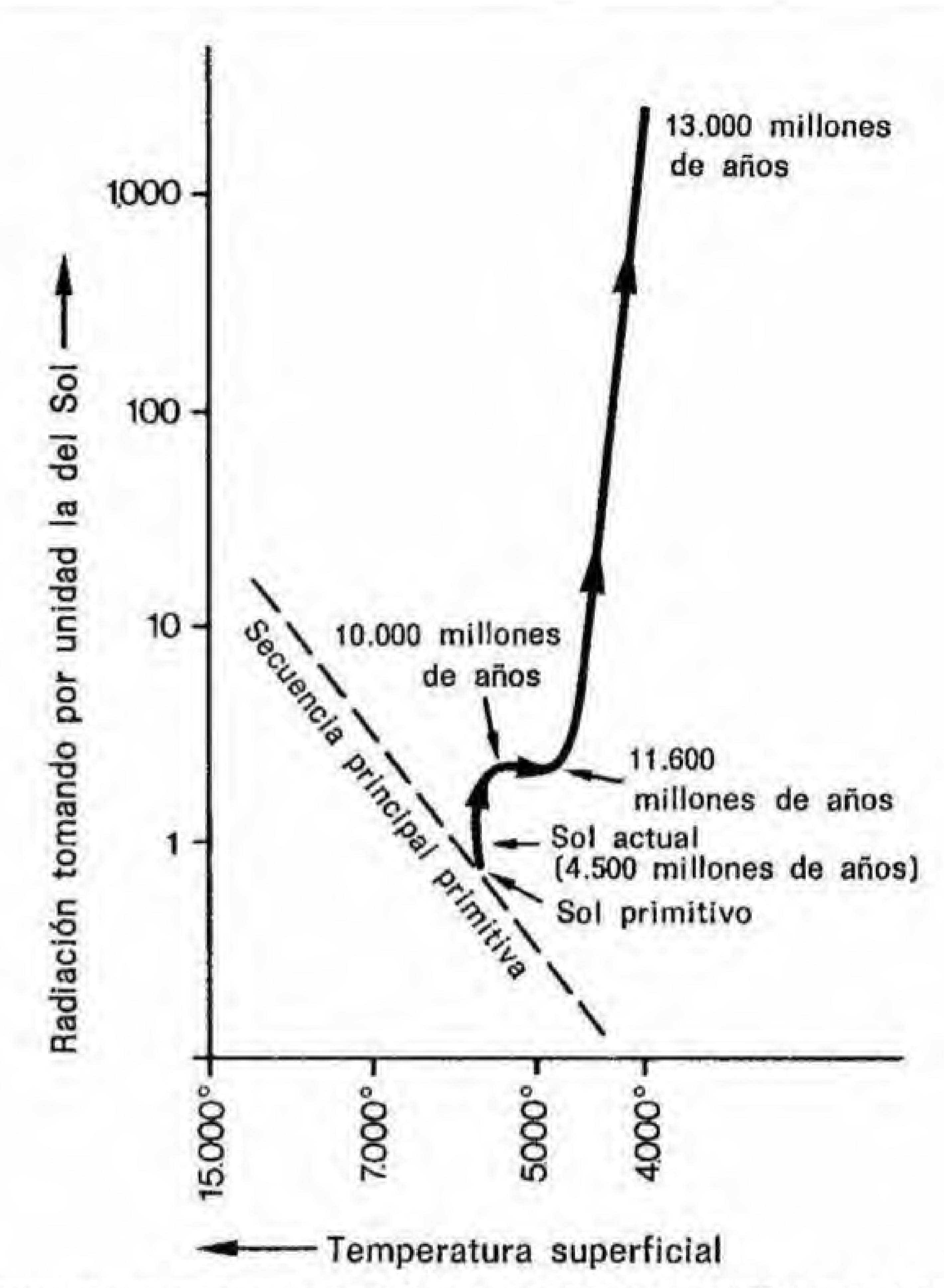
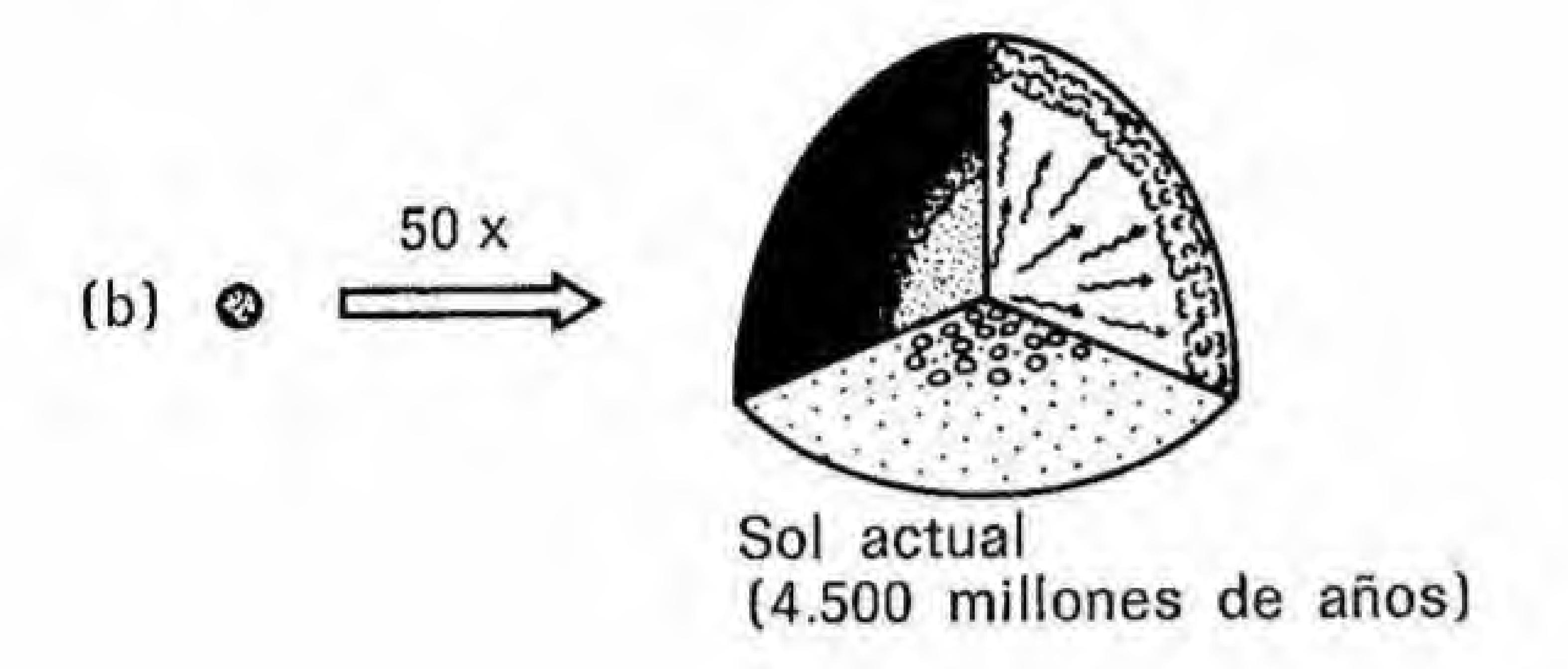
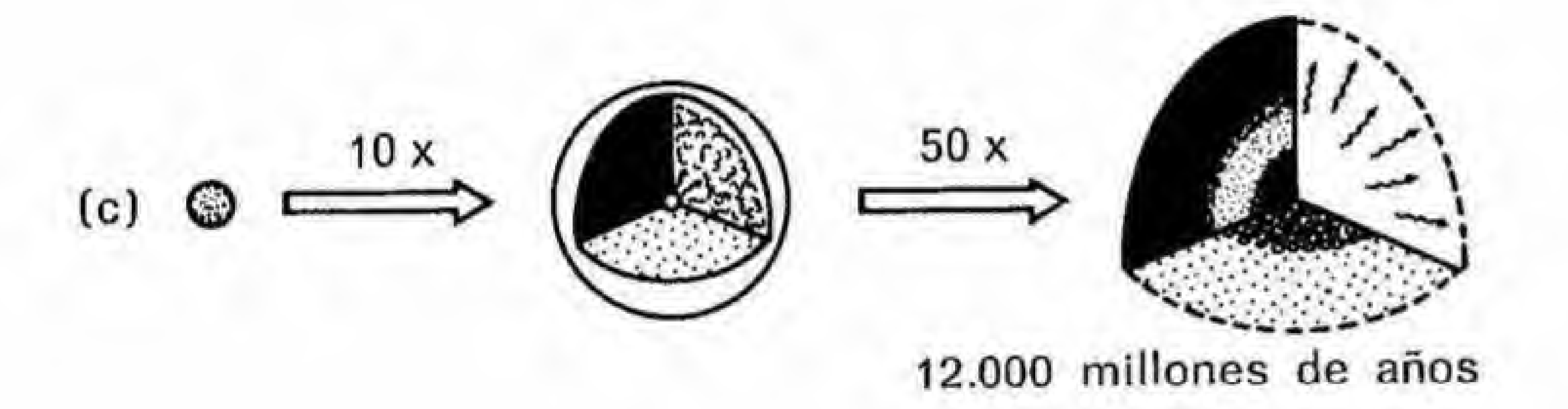
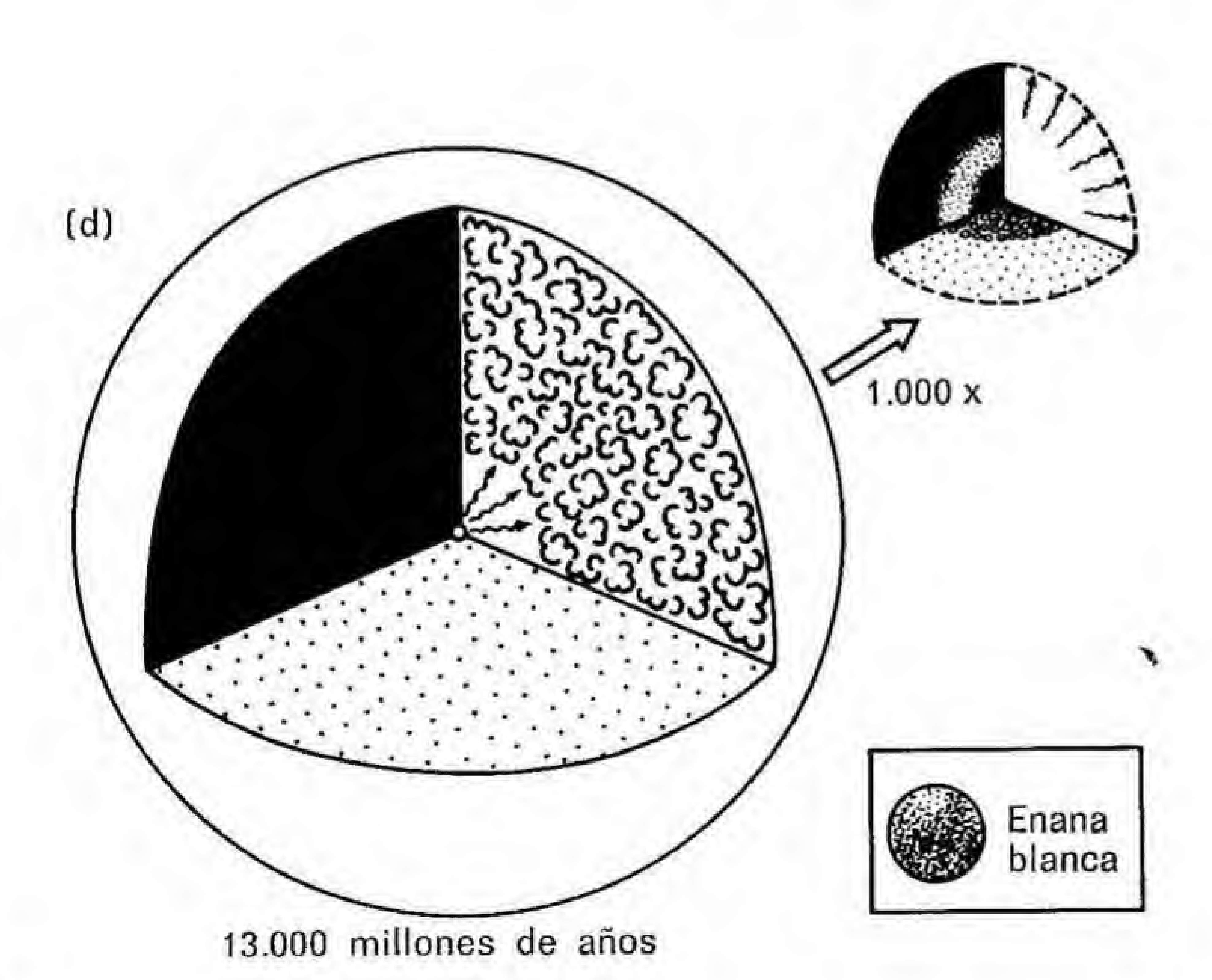


Fig. 5-1. Trayectoria evolutiva del Sol en el diagrama HR. La evolución parte del Sol primitivo, pasa por el Sol actual, se separa de la secuencia principal primitiva y se dirige al dominio de las gigantes rojas. Las indicaciones de edad señalan el tiempo transcurrido desde el momento de encenderse el hidrógeno en el Sol primitivo.

presenta nuestro modelo del Sol actual. Vamos a compararlo con el Sol primitivo de la figura 4-2 (a). Los dos modelos no se diferencian mucho. Ambos tienen una capa exterior convectiva, mientras que en su interior la energía se transporta al exterior por radiación. Además, la fusión del hidrógeno tiene lugar mediante la cadena protón-protón. Pero el Sol actual se diferencia del Sol primitivo en que su región central está enriquecida con helio de nueva formación. En sus capas exteriores un kilogramo de materia contiene sólo 297 gramos de helio, en cambio, en el centro hay 590 gramos de helio en







cada kilogramo. O sea, que desde el inicio de la fusión del hidrógeno se han formado unos 300 gramos más de helio.

En la capa exterior la materia estelar se mezcla continuamente. Cada gramo de materia que ahora está nadando en la superficie estaba hace poco en el fondo de esta capa hirviente, cuya temperatura de un millón de grados es 170 veces mayor que la de la superficie. Un dato procedente de otro dominio muy distinto nos confirma que la zona convectiva de la superficie llega hasta esta profundidad tan caliente.

¿DÓNDE ESTÁ EL DEUTERIO DEL SOL?

El deuterio es un isótopo del hidrógeno cuyo núcleo atómico tiene un protón y un neutrón. En las estrellas el deuterio no resiste mucho el calor. Bastan 500.000 grados para que se fusione con los núcleos de hidrógeno normal y forme un isótopo del helio. El deuterio existe en la naturaleza en cantidades reducidas; por ejemplo, en la materia interestelar a partir de la cual se han formado todas las estrellas. El deuterio debió de estar presente en la formación del Sol, porque hay también rastros de él en la Tierra. La proporción normal, por ejemplo en el agua del océano, es de 5.000 átomos normales de hidrógeno por un átomo de deuterio.

En la atmósfera solar falta este isótopo. Esto no ha de extrañarnos porque, según nuestros modelos de computador, en las capas exteriores del Sol no puede haber deuterio. La convección es cul-

◀ **Fig. 5-2.** Estructura interior de los modelos solares en distintas fases de evolución. La representación es la misma que la de la figura 4-2. Ahora, contrariamente a la figura indicada, tenemos regiones en las que el helio se ha enriquecido; unos circulitos señalan allí la presencia del helio recién creado, que todavía está mezclado parcialmente con la materia original rica en hidrógeno, indicada por puntos. Más tarde en la región central sólo queda helio. A la izquierda están dibujados los modelos a la misma escala (pero no a una escala igual a la de los dibujos de la izquierda de la fig. 4-2) y a la derecha aparecen ampliadas las zonas centrales. Está indicada en cada caso la escala de la ampliación. (a) Sol primitivo, (b) Sol actual. El modelo (c) contiene ya en su centro una esfera de helio, formada después de agotarse el hidrógeno. La combustión nuclear prosigue ahora en una delgada capa que envuelve la esfera de helio. El modelo (d) muestra al Sol como una gigante roja con una gruesa zona convectiva exterior y un núcleo de helio comparativamente pequeño, cuyas dimensiones recuerdan más bien las de una enana blanca. Como comparación se ha dibujado a la derecha a la escala del interior de la figura parcial (d) ampliado mil veces.

pable de ello. Cada átomo de deuterio de la superficie solar llega, más tarde o más temprano, al fondo de la zona convectiva arrastrado por los movimientos ascendentes y descendentes de la materia, y allí queda sometido a temperaturas de un millón de grados. Pero ya antes de llegar allí, el deuterio se habrá transmutado en helio con ayuda de un núcleo de hidrógeno. Por tanto, en el transcurso de la historia del Sol todo el deuterio debió de quedar destruido hace tiempo. Y aunque ahora caiga sobre el Sol deuterio procedente de algún lugar del Universo, en uno o dos años será transportado hacia abajo y quedará destruido.

EL PROBLEMA DEL LITIO

Nuestros modelos de computador no pueden esclarecerlo todo. Cuando se estudia la composición química de la superficie solar, sorprende la rareza de otro elemento, en comparación con su abundancia en la Tierra: el elemento *litio*. Esta sustancia, incluida entre los elementos ligeros, pues su núcleo atómico está compuesto normalmente por tres protones y cuatro neutrones, es muy rara en el Sol. Un kilogramo de materia solar contiene una cantidad de litio cien veces inferior a la que existe en la Tierra y a la que cae sobre ella procedente del Universo en forma de meteoritos. ¿Es posible que también este elemento quede destruido por las altas temperaturas del fondo de la capa de convección?

El litio puede absorber un núcleo de hidrógeno y transformarse en dos átomos de helio, como muestra la figura 5-3. Pero el millón de grados de las capas en donde se mezclan los átomos de litio procedentes de la superficie solar no bastan para ello; el litio queda destruido a mayor profundidad, donde la temperatura es el triple. Ninguno de los modelos de computador que describen el Sol desde su estadio primitivo hasta la actualidad presenta zonas de convección más profundas; por tanto, nuestros cálculos no pueden explicar la falta de litio en el Sol. ¿Faltaba ya el litio desde un principio? Es improbable. Se cree que el Sol, los planetas y los meteoritos se formaron a partir de la misma materia, y que por tanto originalmente tenían idéntica composición química. Volveremos a tratar el tema cuando hablemos del origen de las estrellas. ¿Dónde se ha quedado pues el litio del Sol? ¿Qué puede salvarnos del dilema?

El problema se resuelve remontándonos a una época anterior al Sol primitivo, entre la formación de la estrella y el encendido del

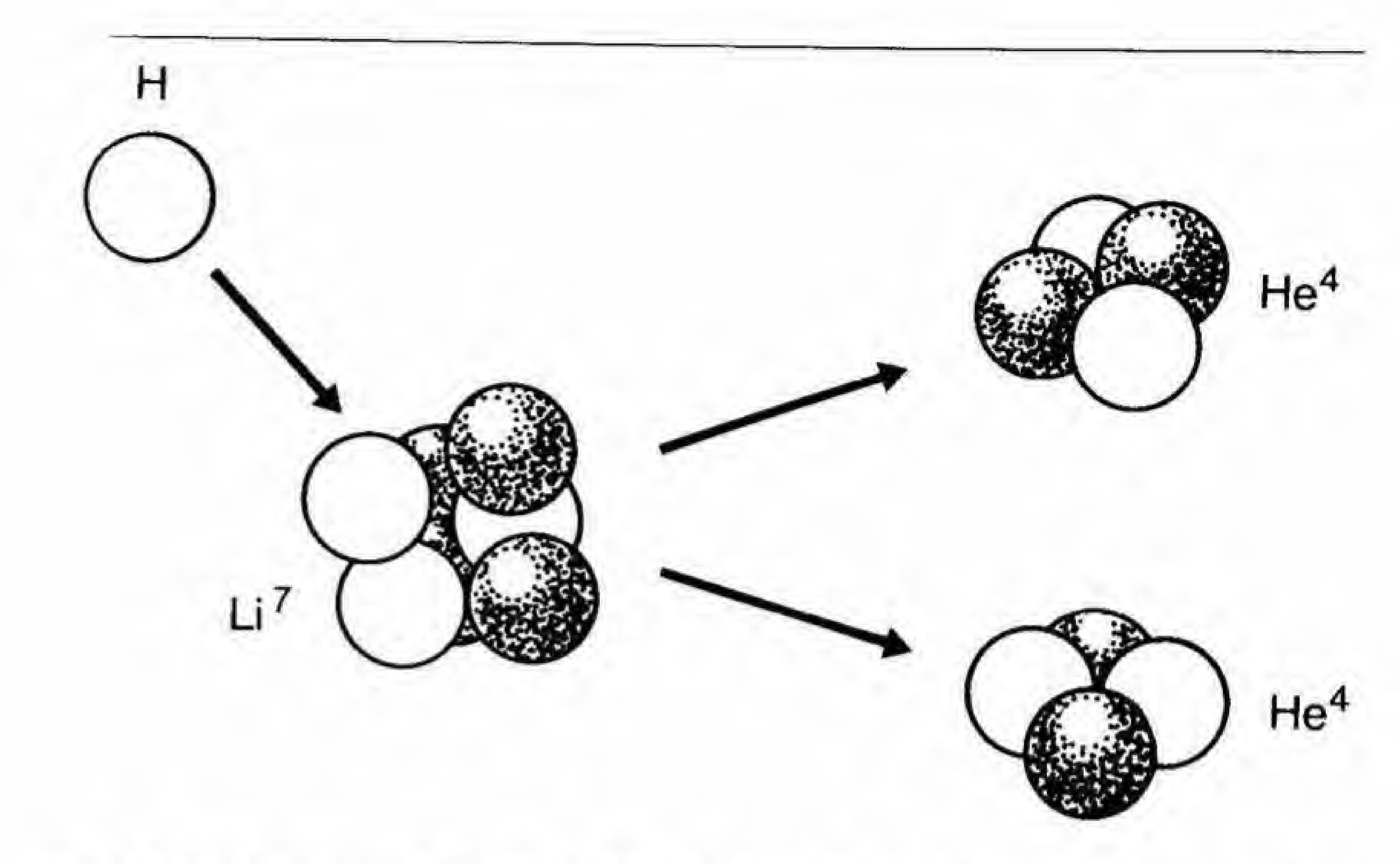


Fig. 5-3. A una temperatura de tres millones de grados los átomos de litio del interior de una estrella se transforman en helio ayudados por núcleos de hidrógeno.

hidrógeno. En aquel entonces, la zona de convección del Sol llegaba a mucha mayor profundidad: llegaba a una región donde la temperatura era por lo menos de 3 millones de grados. La mayor parte del litio de las capas exteriores del Sol se mezcló entonces en el interior y se destruyó. Hablaremos de ello en el capítulo 12, porque primero debemos saber qué había antes del Sol primitivo. Continuemos estudiando ahora el proceso de envejecimiento del Sol, y dejemos para más tarde sus años de juventud.

El destino de las estrellas parecidas al Sol después de agotar su reserva de hidrógeno, y que muestra la trayectoria evolutiva de la figura 5-1, se explicó en los años cincuenta de nuestro siglo. Fue entonces cuando se aplicaron por primera vez computadores de gran potencia al cálculo de la evolución estelar. Antes de exponer los resultados, quisiera contar unos hechos históricos que en parte son también personales.

AÑO 1955, LA IRRUPCIÓN EN EL REINO DE LAS GIGANTES ROJAS

Aquel año se publicó un trabajo de dos grandes astrofísicos de la época. Era tan extenso que no pudo imprimirse en los cuadernos normales del "Astrophysical Journal", sino en la serie de cuadernos complementarios que se publicaban paralelamente. Uno de los autores era Fred Hoyle, el otro Martin Schwarzschild. Hoyle regentaba la cátedra de Eddington en Cambridge, y había escrito un gran número de importantes trabajos, entre ellos uno sobre la creación de elementos químicos en las estrellas. Además, cuando tenía tiempo para ello, escribía novelas de ciencia ficción. Su obra "La nube negra" se ha traducido a muchos idiomas y se ha adaptado incluso para la radio alemana. El otro autor era Martin Schwarzschild. Cuando murió su padre, el astrónomo Karl Schwarzschild, de quien hablaremos más tarde, Martin tenía cuatro años. Desde niño se interesó por la astronomía, y como contó más tarde, durante mucho tiempo el único obstáculo a su carrera astronómica fue su deseo de ser lechero. Al final, escogió la astronomía porque, según dijo, no tenía suficiente originalidad como para escoger una profesión distinta a la de su padre. Se doctoró en 1935 en Gotinga. Se dice que los Schwarzschild y los Rothschild provienen de la misma callejuela del ghetto de Frankfurt. Era pues vital que el joven astrónomo abandonara lo más rápidamente posible la Alemania del III Reich. De hecho, su hermano, que se quedó en Alemania, escogió más tarde suicidarse. Schwarzschild llegó a EE.UU. pasando por Noruega, y tras la guerra fue nombrado profesor de Princeton.

Después de la guerra, en la escuela de Princeton, donde enseñaba Schwarzschild, se construían modelos estelares de la secuencia principal y se intentaba estudiar el comportamiento de las estrellas al agotarse el hidrógeno de su centro. El trabajo de 1955 tuvo una importancia decisiva porque por primera vez calculaba la transformación en gigantes rojas de estrellas de la secuencia principal.

En aquella época empezaban a utilizarse en gran escala los computadores en astrofísica. Hoyle y Schwarzschild los utilizaron para simular la evolución estelar. Poco después yo tuve ocasión de seguir sus pasos.

En otoño de 1957, Stefan Temesvary (1915-1984), que fue profesor de la Universidad de Tubinga, y yo, pasamos la noche sentados ante el G 2 de la Böttingerstrasse de Gotinga. G 2 era uno de los computadores construidos por Heinz Billing y sus colaboradores del Instituto de Física Max Planck. En aquella época los computadores todavía no podían comprarse por encargo; se construían a mano en los Institutos. Hoy en día calculadoras programables de mesa tienen a menudo igual potencia que máquinas como aquéllas, que llenaban una habitación entera, calentándola con sus válvulas. Ludwig Biermann, director en aquel entonces del Departamento de Astrofísica del Instituto, nos había invitado a llevar a cabo con aquella máquina los cálculos de Hoyle y Schwarzschild aplicando un procedimiento de cálculo mejorado, que habíamos inventado.

Si se compara la manera de trabajar de aquella época con los métodos actuales, se comprende lo rápido que ha sido el progreso en este campo. Para obtener modelos estelares se partía de algunos valores de prueba de la luminosidad y la temperatura superficial, se calculaba paso a paso hacia dentro y al llegar a las proximidades del centro de la estrella se descubría que allí el modelo empezaba a fallar, o para decirlo en lenguaje matemático, que allí no se cumplían las condiciones límite interiores. Era preciso entonces repetir todo el cálculo con valores más ajustados de la luminosidad y la temperatura superficial, confiando que cumplirían mejor las condiciones interiores. Había que llevar a cabo numerosas "integraciones" desde la superficie de la estrella al centro, para lograr un modelo razonable. Estos cálculos suponían un viaje hacia el interior de la estrella que duraba siempre cinco horas, en el curso del cual hacíamos votos para que la máquina no fallara, pues en tal caso debíamos comenzar de nuevo desde el principio. Hoy el computador del mismo instituto, que mientras tanto se ha trasladado a Munich, calcula un modelo estelar entero en unos segundos. Esto es posible no sólo gracias a los computadores, sino al trabajo de un hombre y de sus colaboradores en Berkeley.

Pero hablaré de esto en el siguiente capítulo. Ahora debemos estudiar el agotamiento de la reserva de hidrógeno en estrellas de tipo solar. Es el destino futuro de nuestro Sol, como veremos luego, e influye también sobre nuestro propio destino en este planeta.

EL FUTURO DEL SOL

¿Qué pasa luego? ¿Qué sucederá cuando se haya transformado cada vez más hidrógeno en helio y éste se vaya acumulando en el centro del Sol? Los modelos demuestran que al principio, es de-

cir, en los próximos 5.000 millones de años, no pasa casi nada. El Sol recorre lentamente su trayectoria evolutiva en el diagrama HR hacia arriba, como vemos en la figura 5-1, es decir, hacia las luminosidades más elevadas, y su superficie se vuelve primero algo más caliente y luego un poco más fría. Pero no hay que esperar muchos cambios.

Pasados 10.000 millones de años desde el nacimiento del Sol primitivo, la luminosidad es ya el doble de la actual. La humanidad, suponiendo que todavía exista, sufre desde hace tiempo dificultades climáticas, pero la situación va a empeorar todavía más. En primer lugar, el globo solar es el doble de grande que ahora.

Mientras tanto, en el interior del Sol se han producido cambios esenciales. En el centro se ha gastado todo el hidrógeno; la región central está ocupada por una esfera de helio (véase fig. 5-2 [c], que representa un modelo con una edad de 12.000 millones de años). En esta esfera es imposible la combustión nuclear, porque todo el hidrógeno se ha agotado y la temperatura es demasiado baja para la fusión del helio (véase fig. 3-4). La fusión del hidrógeno continúa únicamente en la superficie de esta esfera de helio, allí donde el helio limita con materia que contiene hidrógeno. El hidrógeno se quema y se incorpora a la esfera de helio, cuya masa aumenta progresivamente. Antes, el Sol quemaba hidrógeno en una región central, ahora lo quema en una corteza y se va comiendo las capas exteriores ricas en hidrógeno. A medida que pasa el tiempo aumenta la masa de la esfera central de helio.

La estrella se desplaza hacia la parte superior derecha del diagrama HR hacia el dominio de las gigantes rojas, como vemos en la figura 5-1. El globo solar aumenta de tamaño y al mismo tiempo se enfría. Al cabo de 13.000 millones de años el Sol es cien veces mayor que ahora y su luminosidad 2.000 veces superior. Sin embargo, la temperatura superficial ha disminuido bastante, manteniéndose en 4.000 grados, 1.800 grados menos que ahora.

Pero esto no nos va a salvar. Hace tiempo que los océanos de la Tierra se han evaporado, y el plomo se funde al Sol. La Tierra se ha transformado en un horno ardiente que no puede albergar ya vida alguna. Un enorme globo solar, que ocupa más de la mitad del cielo diurno, brilla sobre la superficie terrestre abandonada por la vida. Nos gustaría saber, por lo menos en este momento, si la previsión que nos ofrece el computador es realmente cierta.

Nuestras observaciones han descrito correctamente las propiedades esenciales del Sol actual. ¿Deduciremos de ello que también el futuro está predicho correctamente con todas sus terribles consecuencias? Disponemos de una demostración directa al respecto. Cuando observamos en el diagrama HR un cúmulo estelar globular como el de la figura 2-9, descubrimos que la secuencia principal está vacía hasta el nivel de 3 luminosidades solares, lo cual corresponde a 1,3 masas solares. O sea, que las estrellas más brillantes de la secuencia principal pertenecientes a este cúmulo estelar han agotado ya el hidrógeno de su centro. Las estrellas de masa igual o

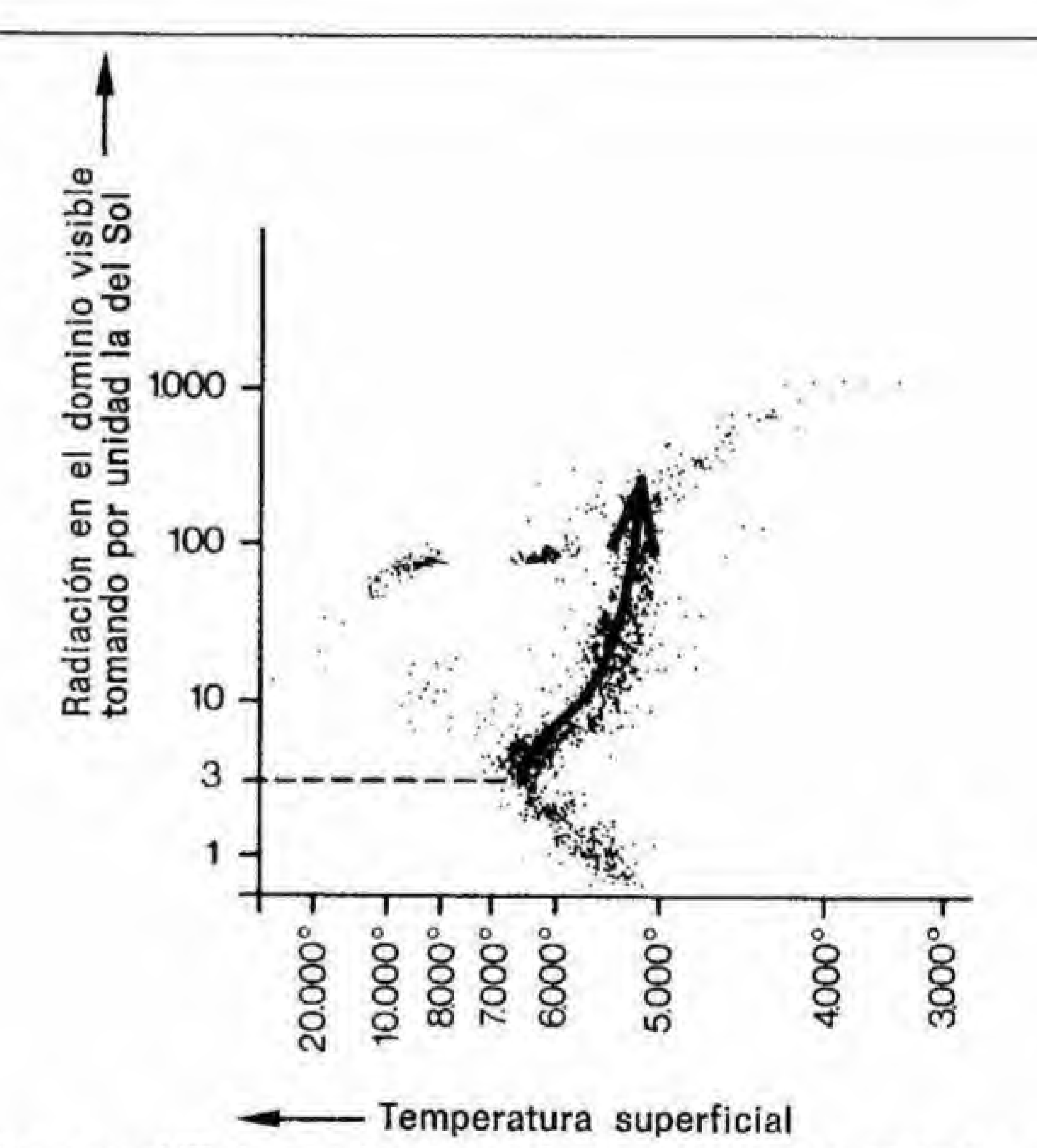


Fig. 5-4. Diagrama HR de un cúmulo estelar ya reproducido en la figura 2-9, pero ahora con una trayectoria evolutiva que indica cómo se desplazan las estrellas de la secuencia principal hacia el dominio de las gigantes rojas. La trayectoria evolutiva aquí representada no es comparable cuantitativamente con la trayectoria dada en la figura 5-1 para el Sol por los siguientes motivos: porque las estrellas que han abandonado la secuencia principal tienen una masa algo distinta (las estrellas de masa solar de este cúmulo todavía están en la secuencia principal), porque las estrellas del cúmulo globular tienen una composición algo distinta y porque la radiación total y la radiación en el intervalo visible son distintas. Sin embargo, se observa cualitativamente que las estrellas de este cúmulo globular están en un estadio que nuestro Sol no ha alcanzado todavía.

superior a 1,3 masas solares están situadas en una rama que se desvía de la secuencia principal yendo hacia la parte superior derecha y entra en el dominio de las gigantes rojas. Son estrellas que han evolucionado de manera parecida a lo que el cálculo prevé para el Sol; tampoco su masa se diferencia mucho de la suya.

En la figura 5-4 hemos trazado en negro en el diagrama HR la trayectoria evolutiva de una estrella parecida al Sol. Es evidente que en los cúmulos estelares las estrellas evolucionan como hemos previsto que va a evolucionar el Sol en el futuro. Vemos allí estrellas que ahora mismo están subiendo rápidamente por el diagrama hacia la derecha, como esperamos que haga el Sol dentro de 8.000 millones de años. Estas estrellas se han avanzado al Sol. Y nos indican el camino que él seguirá. Si alrededor de algunas de estas estrellas hubo planetas con vida, esta vida se extinguió hace tiempo, todo rastro de ella desapareció hace tiempo en la tormenta de fuego que estas estrellas hicieron llover sobre ellos. La observación nos confirma que, por desgracia, nuestras previsiones para el Sol son correctas.

LOS NEUTRINOS DEL SOL

Hemos obtenido un Sol de computador con las propiedades observadas en la realidad; los diagramas HR de los cúmulos estelares globulares demuestran que nuestro pronóstico sobre el futuro del Sol es correcto, por desagradable que lo encuentre la humanidad. De momento el Universo para el astrofísico parece estar en orden. Pero desgraciadamente presenta todavía una pequeña imperfección, porque los físicos nucleares insisten continuamente en la posibilidad de que sus ideas sobre la vida de las estrellas no sean del todo correctas y sus modelos de computador pueden estar del todo equivocados.

El motivo de esta duda es una modesta partícula elemental que aparece acompañando la fusión del hidrógeno en helio y que de hecho carece de importancia para el Sol. Y la duda en sí nace de un experimento llevado a cabo en una mina de oro abandonada de Dakota del Sur, en EE.UU.

La partícula es el neutrino. Es eléctricamente neutral, carece prácticamente de masa y se mueve a la velocidad de la luz. Al describir la cadena protón-protón vimos que cuando se fusionan dos núcleos de hidrógeno se crean un positrón y un neutrino (fig. 3-3, arriba). El positrón se une muy rápidamente con un electrón produciendo un cuanto de luz. El neutrino se comporta de modo diferente. No reacciona con ninguna partícula, y sin que nadie lo desvíe escapa en línea recta del lugar de su nacimiento a la velocidad de la luz. La materia solar que le rodea no puede influir sobre el neutrino. Para esta partícula, una vez creada, la materia solar no existe. Quien quiera evitar la llegada de un neutrino debería ocultarse detrás de una pared cuyo grueso en kilómetros tendría que expresarse con un número de quince cifras. Afortunadamente no tenemos que evitar los neutrinos, porque nos atraviesan sin afectar ni un solo átomo de nuestro cuerpo.

O sea, que los neutrinos creados en el centro del Sol vuelan en línea recta por el espacio y llegan a la superficie de la Tierra. No importa que sea de día o de noche. De día llegan desde arriba, de noche atraviesan el globo terráqueo sin problemas y llegan desde abajo. Si dispusiéramos de un telescopio de neutrinos que los hiciera visibles podríamos observar en el centro del disco solar una manchita clara, la zona central donde tienen lugar la reacción protón-protón y donde se crean los neutrinos. Este telescopio mostraría la mancha brillante también de noche, con el Sol puesto; bastaría con dirigir el telescopio por debajo del horizonte hacia el Sol, porque para este telescopio la Tierra sería transparente.

Pero no existe ningún telescopio de neutrinos, porque para construirlo sería preciso desviar los neutrinos con lentes o espejos, como desvía la cámara fotográfica la luz o el microscopio electrónico los electrones. Los neutrinos, en cambio, siguen trayectorias rectilíneas.

Sin embargo, hay algunos tipos especiales de átomos que ofrecen a los neutrinos que los atraviesan una cierta pero pequeña resistencia. El más famoso es un isótopo del elemento cloro, concretamente el Cl^{37}. Para detener un neutrino nuestra única esperanza es el átomo de cloro. Esto casi nunca sucede, pero cuando sucede, el átomo de cloro se traga el neutrino incidente, emite un electrón de su núcleo y éste se transforma en un núcleo del elemento argón (véase fig. 5-5). El átomo de argón creado por este proceso no es el átomo normal del gas noble, sino un isótopo que al cabo de unos 35 días se transforma de nuevo. En esto se basa el famoso experimento con neutrinos solares de Raymond Davis, famoso entre otros motivos porque ha preocupado tanto a los astrofísicos. Pero antes de hablar de él conviene citar otra dificultad.

El átomo de cloro reacciona sólo ante un neutrino energético,

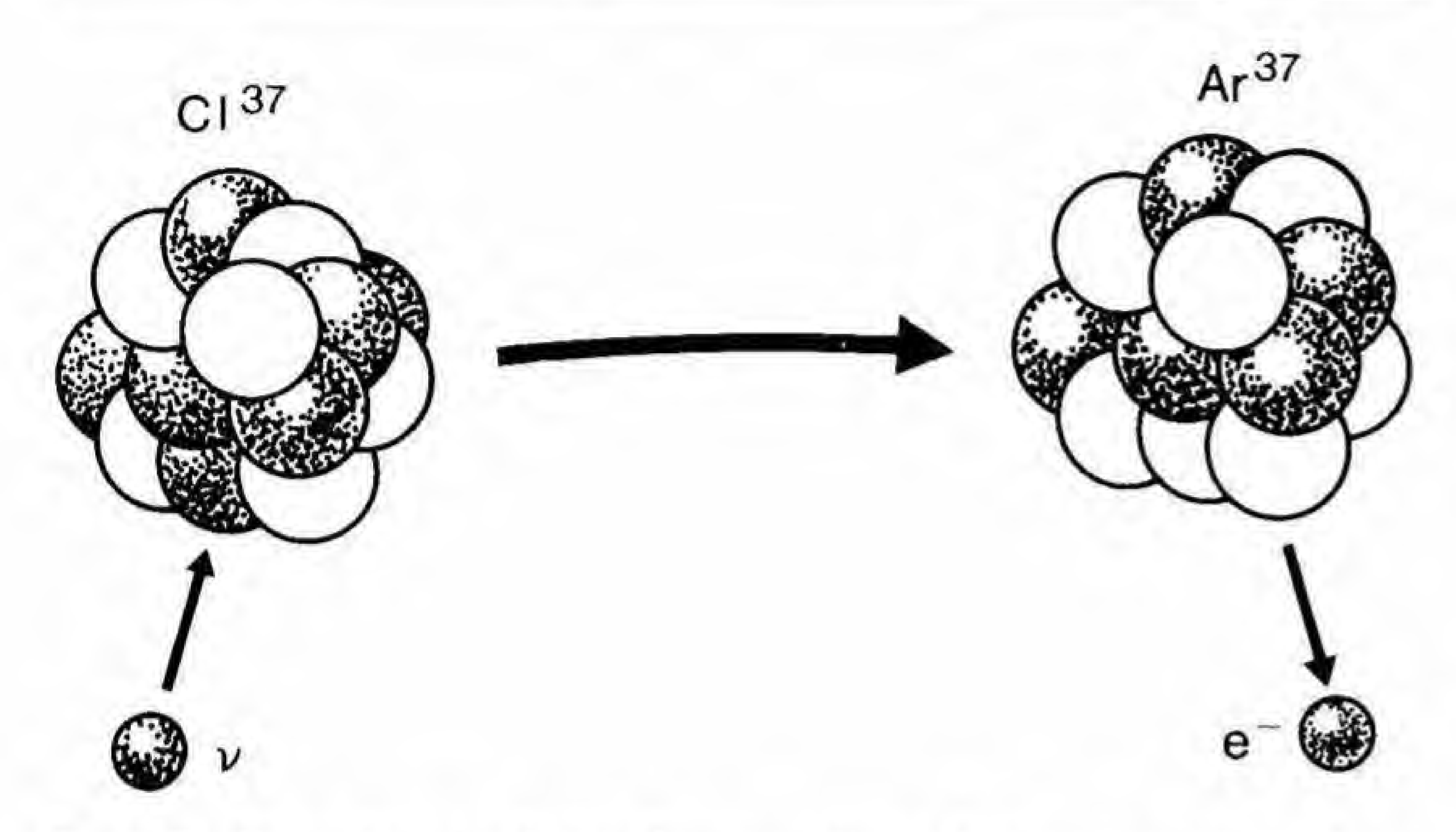


Fig. 5-5. Un neutrino puede transformar un átomo de cloro en un átomo de argón. Se libera entonces un electrón.

pero los neutrinos procedentes de la reacción protón-protón tienen una energía reducida y no afectan en nada al átomo de cloro. Podríamos finalizar aquí nuestras consideraciones sobre los neutrinos solares, si no existiera también en el Sol una fuente de neutrinos enérgicos. Aparte de la cadena protón-protón, tienen lugar una serie de reacciones secundarias que apenas tienen importancia para generar energía en el Sol, y que por esto hemos dejado de lado. Una de estas reacciones tiene lugar con frecuencia creciente a medida que se va formando helio. Está representada en la figura 5-6. Un átomo de helio de número másico 4 choca con un isótopo de helio de número másico 3 formándose berilio de número másico 7. Si un núcleo de hidrógeno choca con este átomo antes de que se desintegre radiactivamente, se crea un isótopo de boro de número másico 8. Este átomo de boro también es radiactivo, y se transforma al cabo de un tiempo en un nuevo átomo de berilio expulsando un positrón y un neutrino de alta energía.

Los neutrinos procedentes de esta reacción son los adecuados para reaccionar con el cloro. También atraviesan la materia sin que les afecte prácticamente nada, ni grandes masas de cloro, pero de

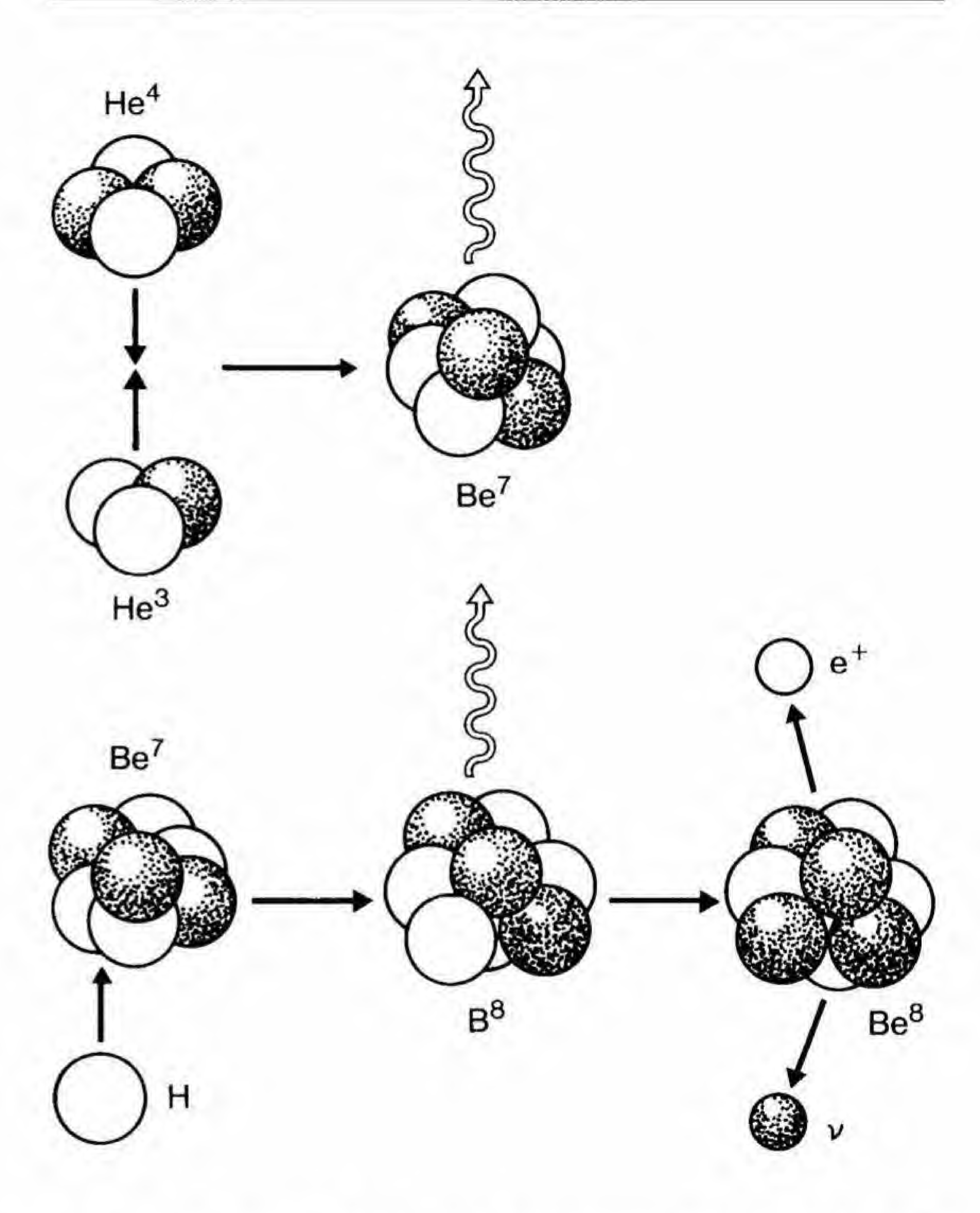


Fig. 5-6. En una cadena secundaria de la reacción protón-protón (véase fig. 3-3) se produce el isótopo radiactivo Be^8, que emite un positrón y un neutrino de gran energía. Las flechas onduladas señalan la emisión de cuantos de luz.

vez en cuando los átomos de cloro reaccionan con un neutrino incidente, aunque el hecho sea muy raro. En esta reacción se basa el experimento ya citado.

EL EXPERIMENTO CON NEUTRINOS DE RAYMOND DAVIS

Es posible construir un detector de neutrinos solares. Por desgracia, sólo observa los neutrinos procedentes de una reacción que astrofísicamente carece de importancia: la cadena secundaria berilio-boro. El detector es ciego a los neutrinos creados en la reacción protón-protón, de importancia vital para el Sol, y por tanto para nosotros. Pero si nuestros modelos solares son correctos, deberíamos captar los neutrinos enérgicos del boro.

Davis ha imaginado el siguiente experimento. En un tanque situado a 1.500 metros bajo el nivel del suelo para evitar reacciones perturbadoras y rodeado de una gruesa capa de agua, hay 390.000 litros de percloroetileno. Éste es un líquido utilizado principalmente en la industria de la limpieza y emparentado con el más conocido tetracloruro de carbono. Cada molécula de este detergente contiene cuatro átomos de cloro, uno de los cuales es en promedio el isótopo Cl^{37}, sensible a los neutrinos. Este líquido proporciona la posibilidad más barata y cómoda de concentrar muchos átomos de cloro en un espacio reducido. Los átomos están irradiados continuamente por los neutrinos procedentes del Sol. En general no pasa nada. Los numerosos neutrinos de baja energía creados en la reacción protón-protón atraviesan el tanque sin obstáculos. Los únicos neutrinos que tienen alguna posibilidad de ser cazados son los procedentes de la desintegración del boro, los neutrinos enérgicos. Si se calcula el número de neutrinos enérgicos de acuerdo con los modelos solares de los astrofísicos, cada día en promedio un átomo de cloro del tanque debería transformarse en un átomo de argón por la acción de un neutrino solar.

Si se esperan varios días, se forman varios átomos de argón. Pero el argón se desintegra al cabo de 35 días, formando de nuevo cloro. Por tanto, si dejamos largo tiempo el líquido expuesto a la acción de los neutrinos solares, se llega a una especie de equilibrio: en promedio se crea y se desintegra un número igual de átomos de argón. Por desgracia, la concentración de átomos de argón creados por el proceso es muy reducida. Si nuestro modelo solar es correcto, en todo el tanque debería haber solamente 35 átomos de argón. Hay pues que buscar y contar estos átomos.

La tarea de buscar 35 átomos de argón en 610 toneladas de líquido deja pequeño el problema de encontrar una aguja en un pajar. En un centímetro cúbico hay tantos átomos de cloro que se necesita un número de 22 cifras para describir la correspondiente cantidad, y en el aparato de Davis hay 390.000 litros, es decir, 390 millones de centímetros cúbicos. Es preciso buscar ahora en todo este tanque 35 átomos de argón. Sin embargo, esta tarea es posible. Se lavan los átomos de argón inyectando helio en el líquido. Las pruebas han demostrado que con este método puede sacarse del tanque el 95 % de los átomos de argón. Los átomos de argón creados por los neutrinos solares son radiactivos; por tanto, una vez fuera del tanque pueden medirse fácilmente en contadores uno por uno cuando se desintegran.

En el líquido de donde se han extraído los átomos de argón se forman de nuevo más átomos de argón, que al cabo de un tiempo se sacan de nuevo por lavado y se cuentan. De este modo el tanque de percloroetileno constituye un detector inagotable, en el que se crean continuamente átomos radiactivos de argón.

Se espera que en el tanque tenga lugar en promedio una reacción por día. Desgraciadamente las mediciones llevadas a cabo desde hace años demuestran que en promedio sólo hay una reacción cada cuatro días. Debemos deducir de ello, que cada segundo sólo llega del Sol una cuarta parte de los neutrinos enérgicos esperados.

Los astrofísicos han calculado y recalculado sus modelos estelares, y Davis ha investigado todos los posibles fallos de su experimento. La contradicción no desaparece. ¿Qué falla en nuestros cálculos solares? ¿Qué falla en el experimento de la mina de oro?

Es difícil imaginar que están equivocados todos nuestros cálculos de computador. Como ya hemos visto, los modelos solares de computador concuerdan en muchos aspectos con el Sol real. De hecho basta introducir pequeñas correcciones en los modelos calculados para reducir el flujo de neutrinos enérgicos procedentes del Sol, con lo que se eliminan las contradicciones con el experimento. Una ligera disminución de la temperatura central de nuestro modelo solar sería suficiente. Lo malo es que no hay ningún motivo para que el Sol tenga en su centro una temperatura inferior a la calculada por el computador.

Una salida al dilema sería que los neutrinos no vivieran indefinidamente. En definitiva los físicos especializados en partículas ele-

mentales tampoco saben muchas cosas sobre los neutrinos. Si estas partículas, como les sucede a otras, se desintegraran al cabo de poco tiempo, en los ocho minutos que tardan en llegar del Sol a la Tierra muchas desaparecerían, y no sería de extrañar que el experimento del cloro contara menos neutrinos de los esperados. Sin embargo, los físicos están firmemente convencidos de que los neutrinos no se desintegran espontáneamente, y esta solución parece excluida.

Personalmente, no creo que nuestros modelos de computador tengan fallos esenciales. Sin embargo, podría ser que las velocidades de reacción calculadas de la cadena berilio-boro fueran erróneas. ¿Qué sucedería si los dos núcleos de helio, el núcleo de helio normal y el del isótopo ligero del helio que inician esta cadena (véase fig. 5-6) reaccionaran entre sí con mucha menor frecuencia de lo que imaginan nuestros físicos nucleares? ¿Presentaría nuestro Sol un aspecto diferente? No, porque esto no influiría en la cadena protón-protón que proporciona energía al Sol. No cambiaría nada en el Sol, únicamente se reduciría el flujo de neutrinos enérgicos, lo cual concordaría con el experimento del cloro. No creo, pues, que nuestras ideas actuales sobre la estructura interior de nuestro Sol tengan que revisarse a fondo, a pesar del experimento del cloro.

EL EXPERIMENTO DEL GALIO

Aparte del cloro hay otros átomos sensibles a los neutrinos. Uno de ellos es un isótopo del elemento galio. Su número másico es 71, y al aceptar un neutrino se transforma en el elemento germanio. La diferencia esencial con el experimento del cloro es que el experimento del galio cuenta también los neutrinos de energía baja. Un detector de galio cuenta los neutrinos de la cadena protón-protón, es decir, los que se liberan cuando se crea energía en el Sol, no los neutrinos de una reacción secundaria y sin importancia.

¿Por qué no se lleva a cabo inmediatamente un experimento con galio? La dificultad reside, en primer lugar, en la tarea de contar todos los átomos de germanio creados en la reacción con los neutrinos. En segundo lugar, se repite el mismo problema de todos los experimentos con neutrinos. Los neutrinos muy raramente se dejan captar por un núcleo atómico. Para que por lo menos un neutrino del flujo solar transforme un átomo de galio cada día en un átomo de germanio hay que poner en el tanque 37 toneladas de galio. Esta

cantidad ya no es despreciable si se compara con las reservas de galio puro existentes en el mundo. El galio aparece como producto secundario en la fabricación del aluminio, y una tonelada cuesta actualmente algo menos de un millón de marcos. Como es lógico, el galio del experimento puede estar en calidad de préstamo, y devolverlo luego, pero es dudoso que así resulte mucho más barato. Es seguro que cada una de las grandes potencias ha acumulado reservas de galio, para poder utilizarlo en cantidad suficiente en época de guerra, pues la industria electrónica necesita el galio. Es decir, que el material no falta.

Mientras escribo esta sección, en el Instituto Max Planck de física nuclear, en Heidelberg, se está trabajando con detectores de germanio. Además, se están llevando a cabo negociaciones en EE.UU., Israel y la República Federal Alemana, buscando materiales para un experimento preliminar, que sólo necesitaría una tonelada de galio. Más tarde o más temprano se llevará a cabo el gran experimento. ¿Confirmará nuestras ideas sobre la estructura interior del Sol? ¿O descubriremos los astrofísicos que carece de valor lo que creíamos saber sobre la generación de energía en el Sol?

Quizás el lector se sorprenda a estas alturas de que estemos hablando sobre el Sol actual ignorando al mismo tiempo algunas propiedades de nuestro Sol. No nos hemos referido al tema de las *manchas solares* y de su ciclo de once años, ni al de las *protuberancias* ni al de las *erupciones* solares, temas que la prensa toca de vez en cuando. El motivo de estos olvidos es que nos hemos concentrado únicamente en las propiedades principales del Sol. Tampoco hemos hablado de los fenómenos detallados de las capas más exteriores del Sol. Pero todos ellos se parecen a nuestro tiempo atmosférico: cuando uno intenta comprender la historia del globo terráqueo no tiene que ocuparse necesariamente de rayos ni de truenos.

VI. LA HISTORIA DE LAS ESTRELLAS DE GRAN MASA

El experimento con neutrinos y cloro todavía no explicado no tortura demasiado la conciencia de los astrofísicos, porque otros ejemplos demuestran que los cálculos de computador concuerdan con lo que vemos en el cielo. Hablaremos de ello en este capítulo. Vamos a estudiar la evolución de las estrellas cuya masa es bastante superior a la del Sol. Las estrellas de gran masa consumen con mayor rapidez sus reservas de energía nuclear, por tanto, las vemos en el cielo en fases muy avanzadas de agotamiento. El astrofísico puede comprobar con ellas si las predicciones calculadas por el computador sobre estas fases evolutivas tienen algo que ver con los procesos reales del Cosmos.

Sin embargo, costó mucho seguir a las estrellas en el computador hasta fases avanzadas de su evolución. Los grandes computadores que aparecieron después de la Segunda Guerra Mundial no permitían por sí solos de modo automático calcularlo todo con mayor precisión.

Para poder explicar la evolución temporal de las estrellas tuvieron que desarrollarse primero nuevos métodos de cálculo.

Quizás el profano se sorprenda de que no baste con disponer de un computador muy potente para resolver un determinado problema de cálculo, y de que sea preciso aplicar nuevos métodos de cálculo. Se entiende muy bien que la inauguración de un nuevo telescopio o el lanzamiento de un nuevo satélite astronómico represente un progreso para la astronomía de observación. Pero no se entiende tanto que la invención de nuevos métodos matemáticos permita efectuar progresos de igual importancia. Los métodos matemáticos no permiten fabricar modelos de su funcionamiento en

madera o en cartón. No pueden representarse con unas cuantas diapositivas en color; no se inauguran en presencia del correspondiente ministro.

LOUIS HENYEY Y EL MÉTODO HENYEY

Después del trabajo de Hoyle y Schwarzschild en 1955, se estancó la teoría de la evolución de estrellas de tipo solar, es decir, de estrellas con una masa parecida a la de nuestro Sol. Los modelos ofrecían en el centro de las gigantes rojas temperaturas de cientos de millones de grados. Tenía que empezar, pues, la fusión del helio. Pero cuando se iniciaban en los modelos las primeras reacciones nucleares de esta nueva fuente de energía, el sistema fallaba. Se sabía que en estas estrellas la combustión del helio transcurría con bastante rapidez y violencia. Ya lo había demostrado Leon Mestel en su tesis de Cambridge en 1952, pero nadie hubiese supuesto que los computadores se negarían rotundamente a proporcionar modelos con los métodos utilizados hasta entonces.

La situación era peor con las estrellas de gran masa. Se consiguió calcular el consumo creciente de hidrógeno en las regiones convectivas del centro; pero cuando empezaban a notarse auténticos efectos de agotamiento, los computadores se "amedrentaban". Era imposible seguir los modelos estelares hasta el dominio de las gigantes rojas, como habían conseguido Hoyle y Schwarzschild con las estrellas de tipo solar. Nada funcionaba como debía a fines de los años cincuenta.

Al mismo tiempo, la industria lanzaba al mercado computadores cada vez más potentes, sin que nosotros pudiésemos explotarlos a fondo. Hoyle, ayudado por sus colaboradores, intentó seguir con el cálculo la evolución de las estrellas de gran masa, sin grandes resultados. Schwarzschild intentó en vano penetrar violentamente a través de la fase de combustión del helio de las estrellas de tipo solar. En aquella época trabajaba en Japón, alrededor del físico Chushiro Hayashi, un grupo que con modelos muy simplificados, con calculadoras de mesa, en cierto modo manualmente, intentaba descubrir el destino posible de una estrella de gran masa cuando ya ha agotado el hidrógeno de su centro. Se supo más tarde que los trabajos de los japoneses eran los que más se habían acercado a la verdad. Pero para ello hubo que esperar primero un invento: el de un nuevo método de cálculo.

En la cara oculta de la Luna está el cráter Henyey. La Unión Astronómica Internacional le dio este nombre en 1970 para honrar a Louis Henyey, que había muerto a principios de aquel mismo año. Henyey había trabajado en campos variados de la astrofísica. Su mayor influencia se debe sin duda a la invención del método de cálculo llamado generalmente hoy día *método Henyey.*

En agosto de 1961, la Unión Astronómica Internacional celebró su Congreso General en Berkeley, California. Era la primera reunión de este tipo a la que yo debía asistir. Unos días antes se había construido el muro de Berlín y un joven astrónomo de Jena, que estaba entonces en Berlín Occidental en casa de unos parientes, tenía que decidir si regresaba a Oriente o se quedaba en el lado occidental del Muro. El astrónomo de Jena Alfred Weigert se quedó en Occidente, y muy pronto jugaría un papel importante en la cuestión que estudia este libro.

Volvamos, sin embargo, a la conferencia de Berkeley. Se presentaron numerosas comunicaciones sobre temas especializados. Una de ellas era de Louis Henyey, miembro del departamento de Astronomía de la Universidad de Berkeley. En ella se describía un nuevo método para calcular modelos estelares. Corría ya la voz de que Henyey había desarrollado un nuevo método. Unos años antes, su grupo había publicado ya un artículo sobre el tema. Pero lo que allí se calificaba de nuevo método parecía incomprensible y nadie, probablemente ni el mismo Henyey, había conseguido con él resultados utilizables. Pero ahora se decía que el autor había simplificado y mejorado a fondo su método.

Henyey no era de las personas que publican mucho y rápido. Por este motivo aquella tarde todas las personas interesadas en el progreso de la teoría de la evolución estelar se reunieron para escuchar su ponencia. Yo no entendí nada, pero tomé ansiosamente mis notas. Después del congreso pude trabajar durante medio año con Martin Schwarzschild en Princeton, y fui testigo de la reconstrucción completa del método descrito por Henyey que Schwarzschild llevó a cabo a partir de sus notas. Yo entonces volví a mis apuntes y en pocos días también comprendí cómo funcionaba el método de Henyey. Schwarzschild lo aplicó inmediatamente al problema de la combustión del helio en estrellas de tipo solar que le atormentaba desde siempre. En poco tiempo consiguió reproducir la fase rápida, casi explosiva, de la evolución. El método de Henyey le permitió seguir una estrella a lo largo de una fase evolutiva que había permanecido cerrada para todos.

En otoño de 1962, después de una estancia en Pasadena, regresé a Munich, llevando en el bolsillo mis estudios del método de Henyey.

Mientras tanto, Alfred Weigert había aterrizado en nuestro Instituto Max Planck, instalado ya en Munich. Él y una joven matemática de seguros, Emmi Hofmeister, estaban dispuestos a construir conmigo modelos estelares según el método de Henyey. El Instituto de Astrofísica, creado a partir del viejo departamento de Astrofísica del Instituto de Física, disponía de posibilidades de cálculo modélicas, y por tanto teníamos vía libre. Queríamos seguir las estrellas de gran masa desde la secuencia principal hasta el dominio de las gigantes rojas, es decir, seguir las estrellas en las que fallaban los métodos convencionales cuando ellas se disponían a abandonar la secuencia principal.

En marzo de 1963, nuestra estrella escogida, un astro de siete masas solares, no sólo había abandonado la secuencia principal, sino que desde hacía tiempo se había hinchado hasta convertirse en una supergigante roja y había empezado a fusionar helio. Enviamos entonces un telegrama a Henyey en Berkeley: "El método Henyey está funcionando en Munich. Thank you!"

Aquella semana se inició la historia de una estrella de siete masas solares.

LA HISTORIA DE UNA ESTRELLA DE SIETE MASAS SOLARES

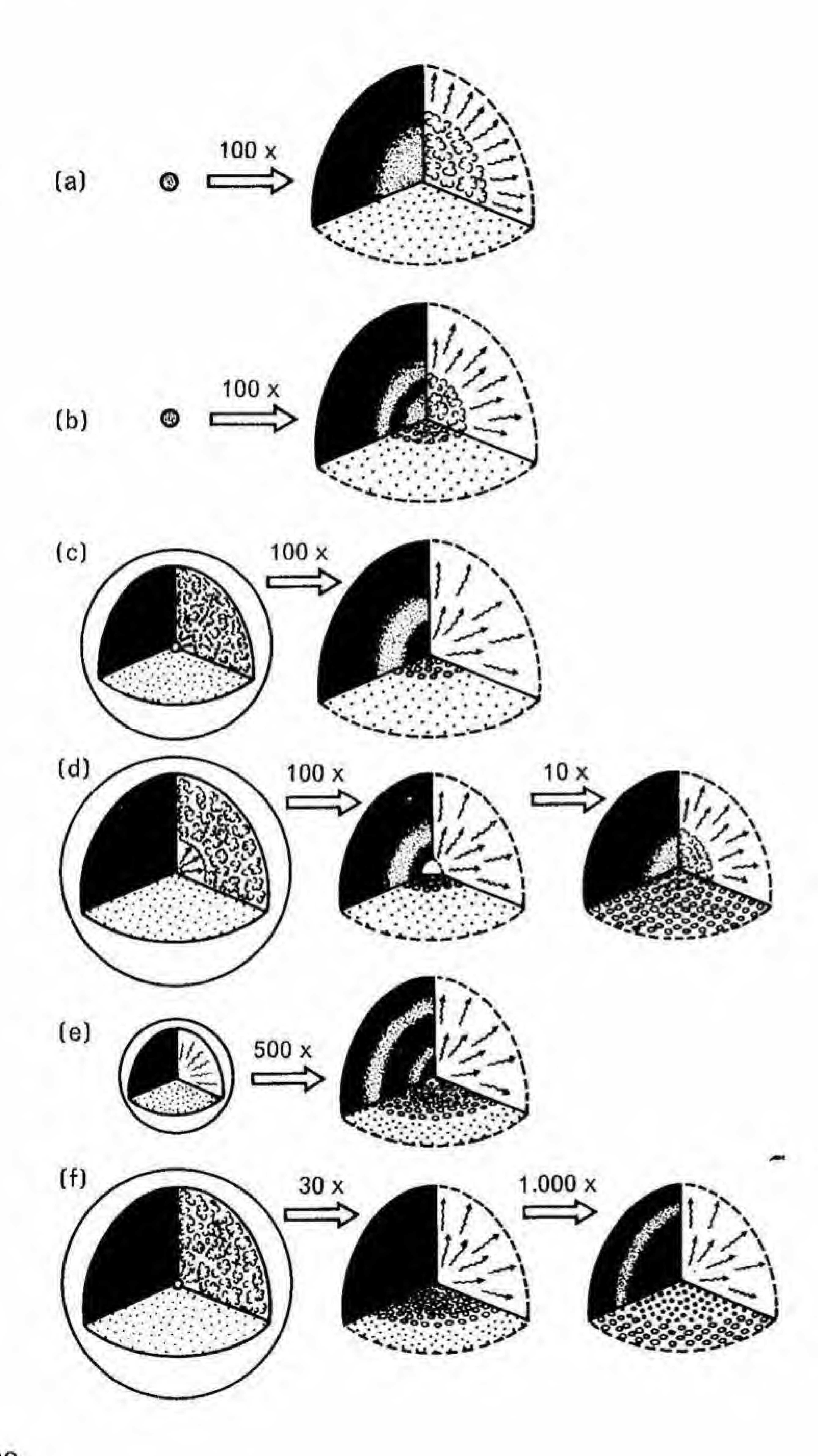
¿Por qué precisamente un astro de masa siete veces superior a la del Sol? Habíamos elegido en aquel momento una estrella de este tipo para nuestro cálculo porque así podíamos estar seguros de que su evolución la llevaría a un estadio con todas las propiedades de un tipo concreto de estrella variable: las *estrellas cefeidas*. Hasta entonces nadie había podido seguir la conversión evolutiva de una estrella normal de la secuencia principal en una estrella cefeida. Ahora cabía la esperanza de alcanzar este objetivo con el potente método de Henyey y de hecho la evolución de nuestra estrella la hizo pasar varias veces por este estadio variable. Volveremos luego a este tema. Ahora quiero explicar punto por punto cómo se comporta una estrella de siete masas solares.

Partimos del estadio inicial de la secuencia principal. El interior de la estrella todavía está formado uniformemente de materia rica

en hidrógeno y tiene todas las propiedades de una estrella de la secuencia principal. Las figuras 6-1 y 6-2 describen su posterior evolución. Los dibujos de la figura 6-1 representan la estructura interna en distintos estadios evolutivos, comenzando con el modelo inicial en 6-1 (a), químicamente homogéneo. La figura 6-2 muestra la trayectoria evolutiva de la estrella en el diagrama HR, junto con trayectorias evolutivas de estrellas de masas distintas. Empieza en la secuencia principal y como era de esperar conduce al dominio de las supergigantes rojas. Ya vimos antes que la reserva de hidrógeno de una estrella sirve para mucho tiempo. La figura 2-11 permite apreciar *grosso modo* que una estrella de siete masas solares puede vivir de su hidrógeno durante unas decenas de millones de años. Transcurrido este intervalo de tiempo, el helio del núcleo convectivo se ha enriquecido ya notablemente. Pero esto altera muy ligeramente la estructura total de la estrella. Su radio aumenta algo, su temperatura superficial baja primero para subir después, la luminosidad se eleva un poco. Por tanto, la estrella empieza moviéndose lentamente en el diagrama HR (en la figura 6-2), primero hacia la derecha y luego de nuevo hacia la izquierda. Durante todo este tiempo se mantiene en la banda de la secuencia principal. Transcurridos unos 26 millones de años después del inicio de la combustión del hidrógeno, la reserva de energía nuclear en el centro de la estrella se ha agotado. Ahora tienen lugar en el interior de la estrella transformaciones importantes.

La generación de energía en la región central no basta ya para cubrir las necesidades de la estrella. Por tanto, empieza a quemarse hidrógeno algo más hacia fuera, en un dominio en forma de cáscara alrededor del núcleo ya consumido; se forma así una fuente de energía estratiforme, como vimos en la historia evolutiva del Sol (fig. 6-1 [b]). Por encima de esta capa activa hay todavía la materia original de la estrella, rica en hidrógeno. Pronto dentro de la cáscara sólo queda helio. La estrella posee ahora un núcleo de helio sobre cuya superficie el hidrógeno se transforma en helio.

La evolución consiguiente es muy rápida. El núcleo de helio dentro de la capa activa se contrae y se calienta, mientras que la corteza exterior de la estrella se ensancha y por tanto se enfría. La temperatura superficial desciende pronunciadamente, pero la luminosidad se mantiene constante. La estrella se mueve horizontalmente hacia la derecha en el diagrama HR y se convierte en una supergigante roja (véanse figs. 6-1 [c] y 6-2). Esta transformación tiene lugar en sólo 500.000 años. En este intervalo de tiempo relati-



vamente breve la estrella recorre todo el diagrama HR de izquierda a derecha.

En el dominio de las supergigantes rojas se produce ahora un nuevo fenómeno. Las capas exteriores al enfriarse se vuelven opacas a la radiación. La convección se encarga ahora del transporte de energía, y en la estrella se forma una gruesa zona exterior de convección que llega desde la superficie hasta lo hondo. El 70 % de toda la masa estelar forma parte temporalmente de este dominio convectivo exterior. Sin embargo, la profundidad de la zona de materia en movimiento ascendente y descendente no es tal que el helio formado en la zona central pueda mezclarse y salir hacia fuera. El helio permanece intacto alrededor del punto central.

Pero también el interior entra en una nueva fase evolutiva. Mientras la zona exterior se ensancha, el núcleo de helio quemado se contrae fuertemente, y la densidad aumenta tanto que ahora un centímetro cúbico pesa 6 kilogramos. La materia al verse tan comprimida se calienta cada vez más, alcanzando al final la temperatura de 100 millones de grados. Como ya sabemos, en este momento el

◀ **Fig. 6-1.** Estructura interna de una estrella de siete masas solares en épocas distintas de su evolución. La estrella está representada a la izquierda siempre a la misma escala. Su interior aparece ampliado a la derecha. En fases posteriores de la evolución ha sido preciso ampliar el doble la zona interior para hacerla visible. Los símbolos son los mismos que los de las figuras 4-2 y 5-2. Después de encenderse el helio se forma carbono, representado por circulitos en negro. (a) Modelo de la primitiva secuencia principal con región central convectiva. (b) La estrella 26 millones de años más tarde. Su diámetro no ha cambiado mucho, pero en la región central la combustión central empieza ya a convertirse en combustión pelicular, como puede observarse en el sector superior izquierdo. (c) Pasados 26,5 millones de años después de encenderse el hidrógeno se ha creado en el centro una esfera de helio. La fusión del hidrógeno prosigue únicamente en una capa. El radio de la estrella ha aumentado. La estrella tiene una gruesa zona convectiva exterior, como puede verse en el sector superior derecho del dibujo parcial de la izquierda. (d) Después de 100.000 años más el helio ha entrado ya en ignición. Ahora la estrella vive de la capa exterior que quema hidrógeno y de la fusión del helio en el centro. La estrella ha aumentado más de tamaño. (e) Pasados 34 millones de años después de encenderse el hidrógeno se ha agotado también el helio del centro. La estrella vive ahora de dos fuentes de energía en forma de capa; en la exterior quema hidrógeno, en la interior helio. La estrella ha disminuido en este momento de tamaño y ha perdido su zona convectiva exterior. (f) Dos millones de años después, la estrella es de nuevo una supergigante roja. Ha perdido la capa que quemaba hidrógeno, y de momento sólo vive de la fusión del helio. Su estructura química es ya muy complicada. En el exterior le queda todavía materia original rica en hidrógeno; debajo hay una capa gruesa de helio que rodea una diminuta esfera central de carbono.

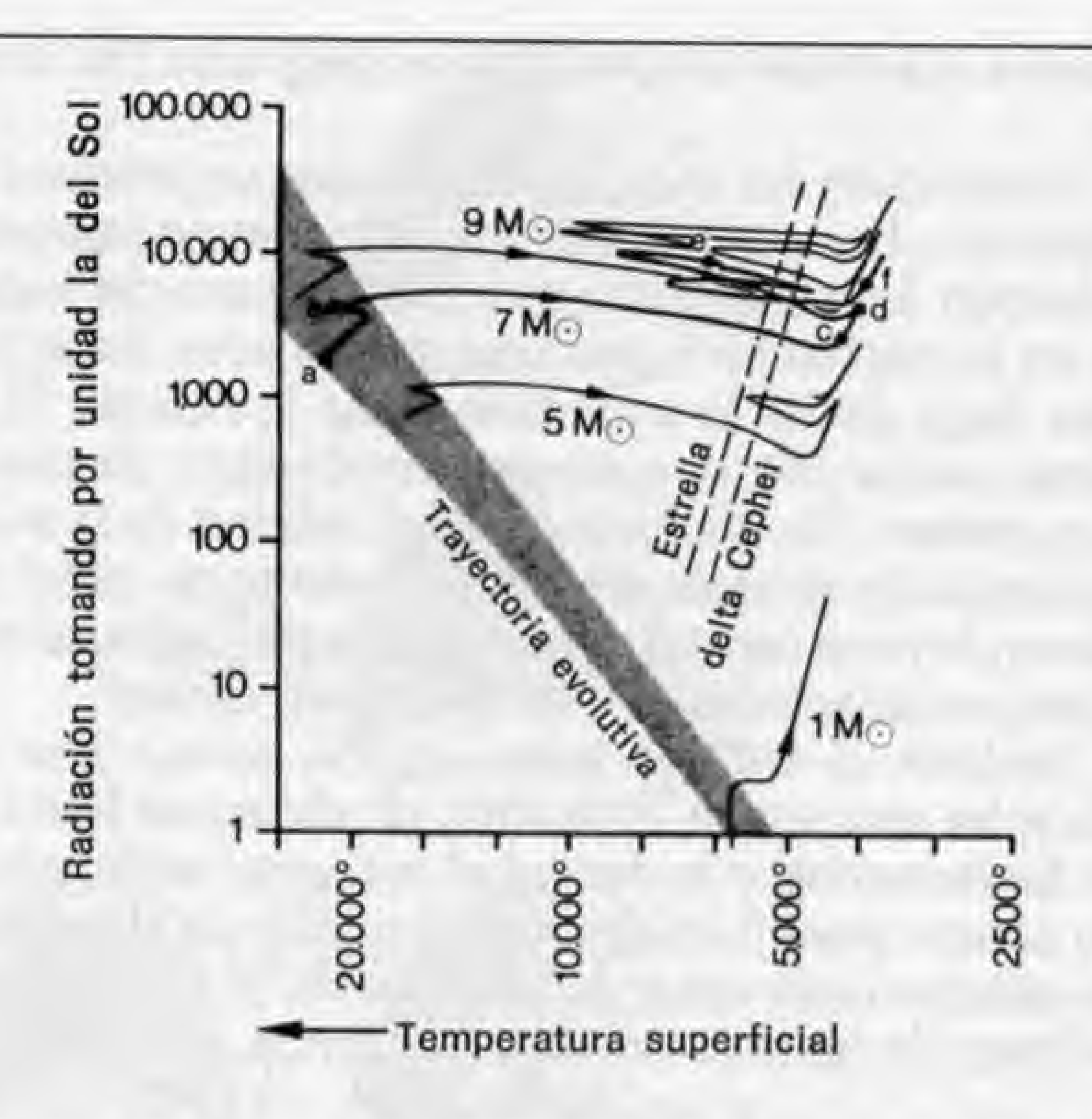


Fig. 6-2. Trayectoria evolutiva de estrellas de distinta masa. Los números que acompañan a las trayectorias indican las respectivas masas en unidades de masa solar. La trayectoria de una masa solar, que vimos ya en la figura 5-1 lleva a la región de las gigantes rojas, pero las trayectorias evolutivas de estrellas de mayor masa llevan a estrellas rojas todavía más grandes del dominio de las supergigantes. Las letras de la trayectoria evolutiva de la estrella (a-f) de siete masas solares, se refieren a los modelos representados en los dibujos parciales de la figura 6-1. Las dos rectas paralelas de trazos limitan la banda donde se encuentran las estrellas cefeidas.

helio puede transformarse en carbono. La estrella, 26,5 millones de años después de que empezara a fusionar hidrógeno en la secuencia principal, dispone ya de una nueva fuente de energía: la fusión del helio para formar carbono (véase fig. 3-4). Como sucedió al iniciarse la combustión del hidrógeno, la del helio se concentra al principio en la parte más interior y cercana al centro de la estrella. Se crea aquí de nuevo un núcleo convectivo, pero relativamente pequeño. Ahora la estrella dispone de dos fuentes de energía para emitir luz: la capa donde el hidrógeno se transforma en helio y las reacciones nucleares del centro, donde el helio se transforma en carbono (véase fig. 6-1 [d]).

La evolución de nuestra estrella modelo se hace ahora muy complicada. La región más interior se enriquece en carbono, y en el transcurso del tiempo agota su reserva de helio. El helio del centro se agota después de quemar durante seis millones de años. También ahora se forma una nueva capa activa donde el helio se transforma en carbono. La estructura química de la estrella ya no es tan simple: en la parte exterior continuamos teniendo la mezcla original rica en hidrógeno que la estrella recibió al nacer, debajo de ella hay una capa de helio y, en su interior, una esfera de carbono. Tienen lugar reacciones nucleares en las dos superficies límite: en la capa donde la mezcla original se transforma en helio, y más adentro, donde el carbono limita con el helio. La estrella tiene ahora dos fuentes de energía en forma de cáscara (fig. 6-1 [e]). La estrella se mueve varias veces a un lado y otro del diagrama HR, pero la mayor parte del tiempo permanece en el dominio de las gigantes rojas. La capa activa exterior pronto se agota. La estrella vive entonces exclusivamente de la fusión del helio (fig. 6-1 [f]). Los procesos siguientes son todavía más complicados. Más tarde o más temprano la zona central alcanza la temperatura a la cual el carbono se transmuta en otros elementos, y la combustión nuclear continúa su curso.

Ésta es la historia de una estrella de siete masas solares, tal como la calculamos en 1963. Después muchos autores han calculado trayectorias evolutivas parecidas para otras masas. Pierre Demarque e Icko Iben en EE.UU. y Bohdan Paczynski en Polonia, además de muchos otros astrónomos, han calculado muchas trayectorias evolutivas y las han comparado con los datos observados. Puede decirse que, en general, las estrellas situadas en el intervalo de 2 a 60 masas solares se comportan de modo parecido a la estrella que hemos visto aquí de siete masas solares. Las estrellas de masa inferior evolucionan de modo parecido al Sol.

TRAYECTORIAS EVOLUTIVAS Y DIAGRAMAS DE CÚMULOS ESTELARES

No está claro todavía, actualmente, qué evolución siguen después las estrellas. Sin embargo, la parte estudiada de sus vidas permite comparar lo calculado con lo observado y comprobar si los procesos evolutivos del interior estelar que el computador describe concuerdan realmente con lo que observamos en el cielo. Como ya

vimos, no es posible, desgraciadamente, controlar de modo directo, con observaciones sucesivas, si los cambios reales de las propiedades de las estrellas, por ejemplo, de su luminosidad y de su temperatura superficial, les hacen pasar en el diagrama HR de la secuencia principal al dominio de las gigantes rojas siguiendo las trayectorias evolutivas teóricas. Para confirmar la teoría hay que efectuar otras comparaciones indirectas con los datos observados. Estudiemos de nuevo en la figura 6-2 las trayectorias evolutivas de una masa solar y de siete masas solares. Ambas llevan de la secuencia principal al dominio de las gigantes y de las supergigantes rojas. Supongamos que ambas estrellas empezaron a fusionar hidrógeno al mismo tiempo. La estrella de más masa al cabo de unos millones de años se desplaza ya hacia la derecha, mientras que la de menor masa permanecerá todavía durante miles de millones de años en la secuencia principal.

Cuando observamos cúmulos estelares vemos estrellas de distinta masa. Las de gran masa están en un estadio más evolucionado que las de poca masa, aunque todas tengan la misma edad. Alfred Weigert y yo, para ilustrar este efecto, imaginamos en los años sesenta un método que representa las diferencias temporales de evolución en un cúmulo estelar. Supusimos un cúmulo estelar artificial formado por 190 estrellas de masas comprendidas entre 23 masas solares y media masa solar. La distribución de frecuencias de estas estrellas entre las distintas masas se corresponde más o menos con la distribución observada en un cúmulo estelar real: sólo hay seis estrellas de masa superior a diez masas solares, pero en cambio, hay 42 estrellas entre una y dos masas solares. Se puede calcular la evolución de cada una de estas estrellas.

Partamos del momento en que todas las estrellas están en la secuencia principal, y dibujemos el diagrama HR de este cúmulo estelar teórico. La secuencia principal obtenida (fig. 6-3 [a]) es perfectamente normal. Pasados sólo tres millones de años se empieza a notar el agotamiento del hidrógeno en el centro de las estrellas más brillantes de la secuencia principal, que como es lógico son también las de mayor masa: la estrella abandona la secuencia principal. Pasados 30 millones de años después de la ignición del hidrógeno, las estrellas de gran masa se han desplazado claramente hacia la derecha (fig. 6-3 [b]). Algunos miembros de nuestro cúmulo estelar artificial, concretamente los de mayor masa, han recorrido ya todas las fases conocidas actualmente de la evolución estelar y se encuentran en una situación que todavía no es accesible a la teoría. Hemos

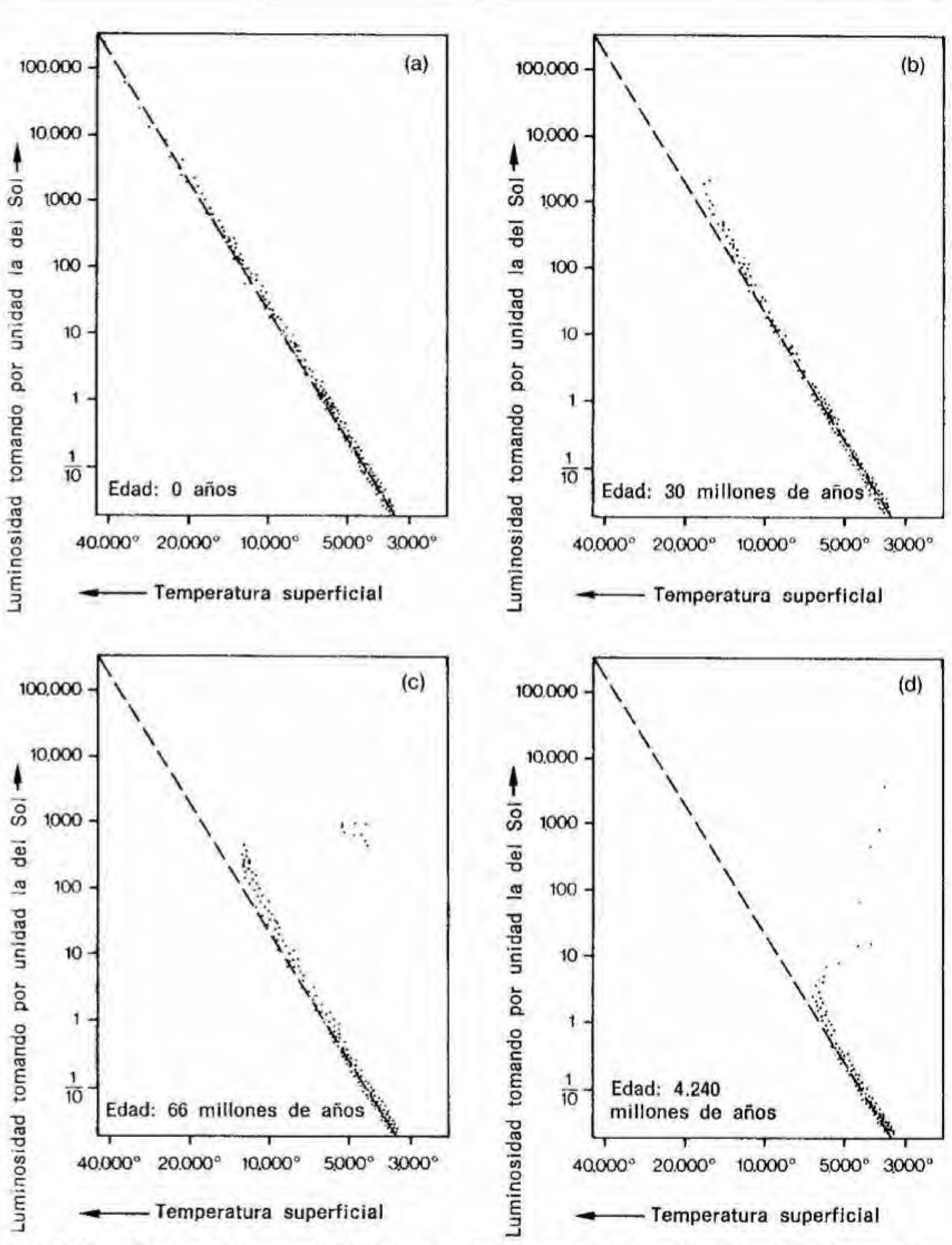


Fig. 6-3. Cuatro diagramas HR de un cúmulo estelar imaginario en distintas edades. Cada punto corresponde a una estrella de determinada masa, que en el transcurso del tiempo se desplaza siguiendo la trayectoria evolutiva calculada por el computador. Está señalada la situación de los puntos representativos en cuatro posiciones temporales.

omitido totalmente estas estrellas de este diagrama y de los siguientes.

El diagrama HR correspondiente a la edad de 30 millones de años presenta ahora varias características del diagrama HR observado. La secuencia principal está ocupada ahora hasta una determinada luminosidad, y a la derecha están las supergigantes rojas. La figura 6-3 (c) muestra el cúmulo estelar artificial 66 millones de años después de la primera ignición del hidrógeno. La secuencia principal se está despoblando desde arriba todavía más; nuevas estrellas, ahora de masa algo menor, están ya en la zona de las gigantes rojas.

La figura 6-3 (d) representa el diagrama HR de nuestro cúmulo estelar artificial en la madura edad de 4.200 millones de años. Su aspecto ha cambiado profundamente en relación a los diagramas anteriores. La parte inferior de la secuencia principal, un codo que se separa hacia la derecha y una rama que sube abruptamente, están en su mayor parte ocupados. El cambio en relación a los diagramas anteriores reside en que las trayectorias evolutivas de las estrellas de poca masa siguen un curso distinto; ahora tenemos estrellas de tipo solar que emigran a la zona de las gigantes rojas. La estructura característica de este diagrama se repite en cúmulos estelares muy viejos, como demuestra una comparación con el diagrama HR del cúmulo estelar de la figura 2-9. Quedan fijados, así, los límites actuales de la teoría. El observador ve al igual que el teórico que la parte inferior de la secuencia principal está ocupada por estrellas y que luego las estrellas se acumulan a lo largo de una curva que tuerce primero hacia la derecha y luego hacia arriba; pero, además, encuentra muchas estrellas situadas en una banda casi horizontal cuya luminosidad en luz visible es cien veces superior a la del Sol. Esta llamada *rama horizontal* del diagrama HR de los cúmulos globulares falta en el diagrama HR de nuestro imaginario y artificial cúmulo estelar. Es evidente que en los cúmulos estelares auténticos se observan estrellas en una fase evolutiva no cubierta todavía por la teoría. Como hemos dicho, en el diagrama del cúmulo estelar artificial hemos omitido las estrellas que ya han recorrido la trayectoria evolutiva conocida. Ahora estas estrellas faltan.

Hemos explicado propiedades especiales de los diagramas de los cúmulos estelares observados. Ahora sabemos exactamente por qué sólo está ocupada la parte inferior de la secuencia principal, por qué en la parte superior las estrellas se desvían hacia las gigantes rojas. Creemos que nuestros modelos de computador han captado procesos reales que tienen lugar en las estrellas.

ESTRELLAS PULSANTES

Volvamos a la trayectoria evolutiva de una estrella de siete masas solares. Hasta ahora no hemos estudiado el hecho de que nuestra estrella cruce repetidamente una banda especialmente interesante del diagrama HR, que en la figura 6-2 aparece limitada por dos rectas paralelas de puntos. Es la banda donde están situadas todas las variables del tipo delta Cephei o estrellas cefeidas.

La estrella delta Cephei es una de las estrellas brillantes de la constelación de Cefeo. John Goodricke —y más tarde volveremos a referirnos a un descubrimiento importante de este sordomudo inglés que falleció joven— observó, en el año 1784, que esta estrella no tiene siempre el mismo brillo. Pronto se descubrió que su brillo aumenta y disminuye con un ritmo de cinco días (véase fig. 6-4). Su brillo en el máximo es casi dos veces y medio superior al del mínimo. Desde entonces se han descubierto muchas estrellas de este tipo. Los períodos de sus alternancias luminosas están situados entre un día y 40 días, su temperatura superficial es de unos 5.300 grados y sus luminosidades permiten juzgar que no son estrellas de la secuencia principal, sino estrellas evolucionadas: gigantes rojas.

La trayectoria evolutiva calculada de la estrella de siete masas

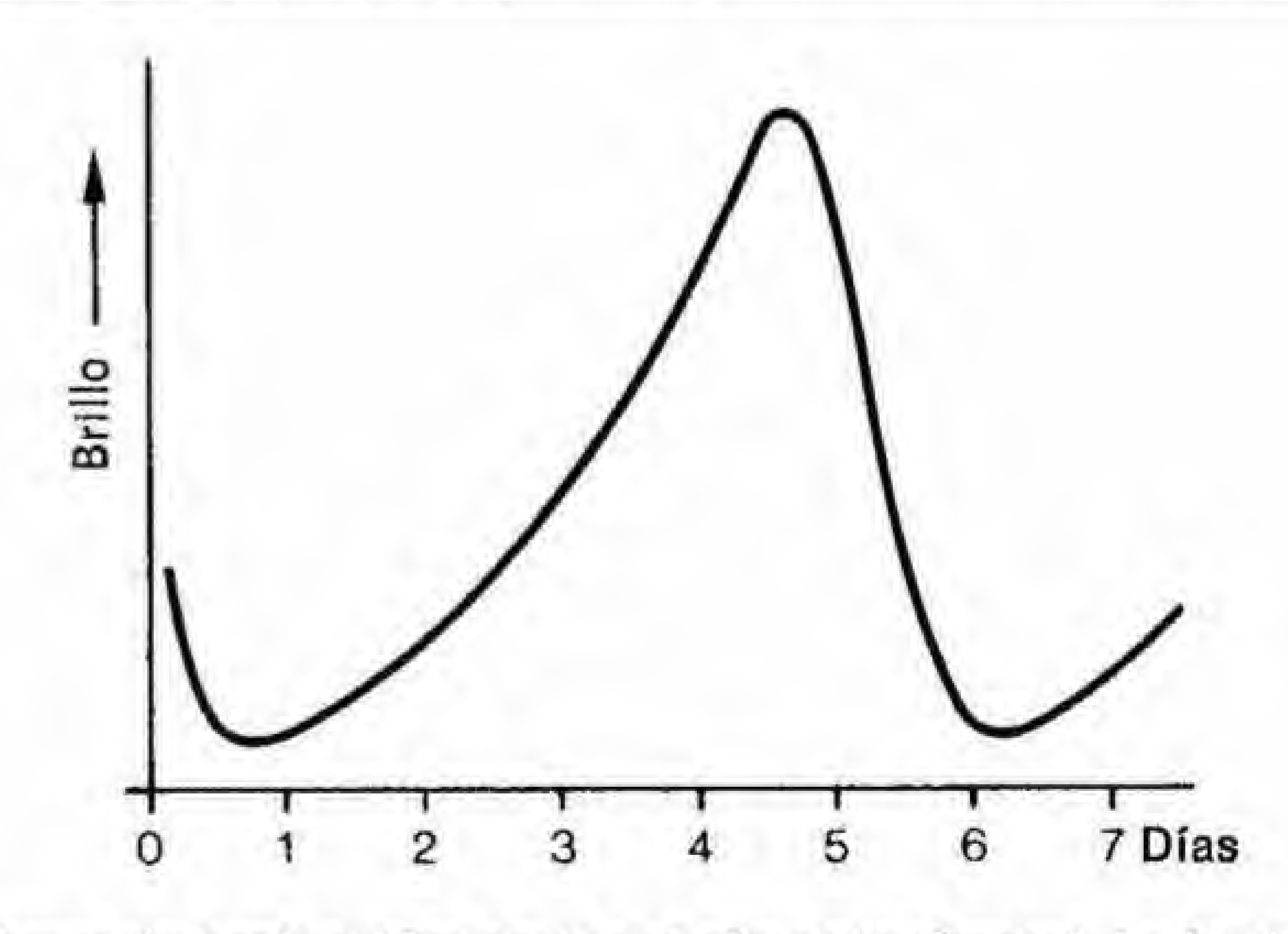


Fig. 6-4. Curva de luminosidad de la estrella delta Cephei. La luminosidad de la estrella sube hasta su máximo con un ritmo periódico de 5,4 días, debilitándose luego de nuevo.

solares la conduce varias veces a este estadio. En la primera ocasión la estrella cruza la banda de las cefeidas de izquierda a derecha. La estrella necesita unos mil años para atravesarla. En la segunda ocasión la atraviesa de derecha a izquierda y necesita 350.000 años. La combustión del helio empezó hace tiempo y la estrella se desplaza ahora lentamente, guiada por la combustión nuclear de este elemento. ¿Qué sucede a una estrella cuya trayectoria evolutiva le obliga a cruzar la banda de las cefeidas? ¿Por qué varía la luminosidad de las estrellas situadas en el interior de la banda? ¿Qué determina el período de estas variaciones? Sabemos, actualmente, que no sólo cambia la luminosidad: además, la estrella se hincha y se deshincha siguiendo el ritmo del cambio lumínico. La estrella pulsa. ¿Por qué pulsan las estrellas situadas en una banda determinada del diagrama HR?

La obra de Eddington, publicada en 1926, sobre la estructura interior de las estrellas contenía ya la respuesta. Pero cuando sir Arthur S. Eddington falleció en 1944, ignoraba todavía lo mucho que se había aproximado veinte años antes a la solución del problema. En 1952, el matemático soviético Sergei Zhevakin, siguiendo el camino indicado por Eddington, hizo avanzar bastante el problema. Pero al principio su trabajo despertó poco eco. En los años 1960-61, John Cox (1926-1984), de Boulder/Colorado, y Norman Baker, profesor actualmente de la Universidad de Columbia, Nueva York, que trabajaba conmigo en Munich, demostramos con cálculos más precisos que la teoría Eddington-Zhevakin explica la pulsación de las estrellas cefeidas. Desde luego falta mucho todavía para comprender detalladamente todas las propiedades de estas estrellas variables, pero ya sabemos *grosso modo* por qué pulsan. Voy a explicarlo con ayuda de un modelo simple. Como es lógico, el modelo sólo esclarecerá los efectos esenciales.

EL MODELO DE LA OLLA APLICADO A UNA ESTRELLA CEFEIDA

Una estrella mantiene su consistencia gracias a su propia gravedad. En una estrella normal la gravedad y la presión gaseosa se mantienen exactamente en equilibrio. El equilibrio de una estrella que hemos citado con frecuencia puede ilustrarse con un modelo sencillo. En la figura 6-5 (a) una tapadera móvil y pesada cierra desde arriba herméticamente una olla. En la olla hay un gas que la

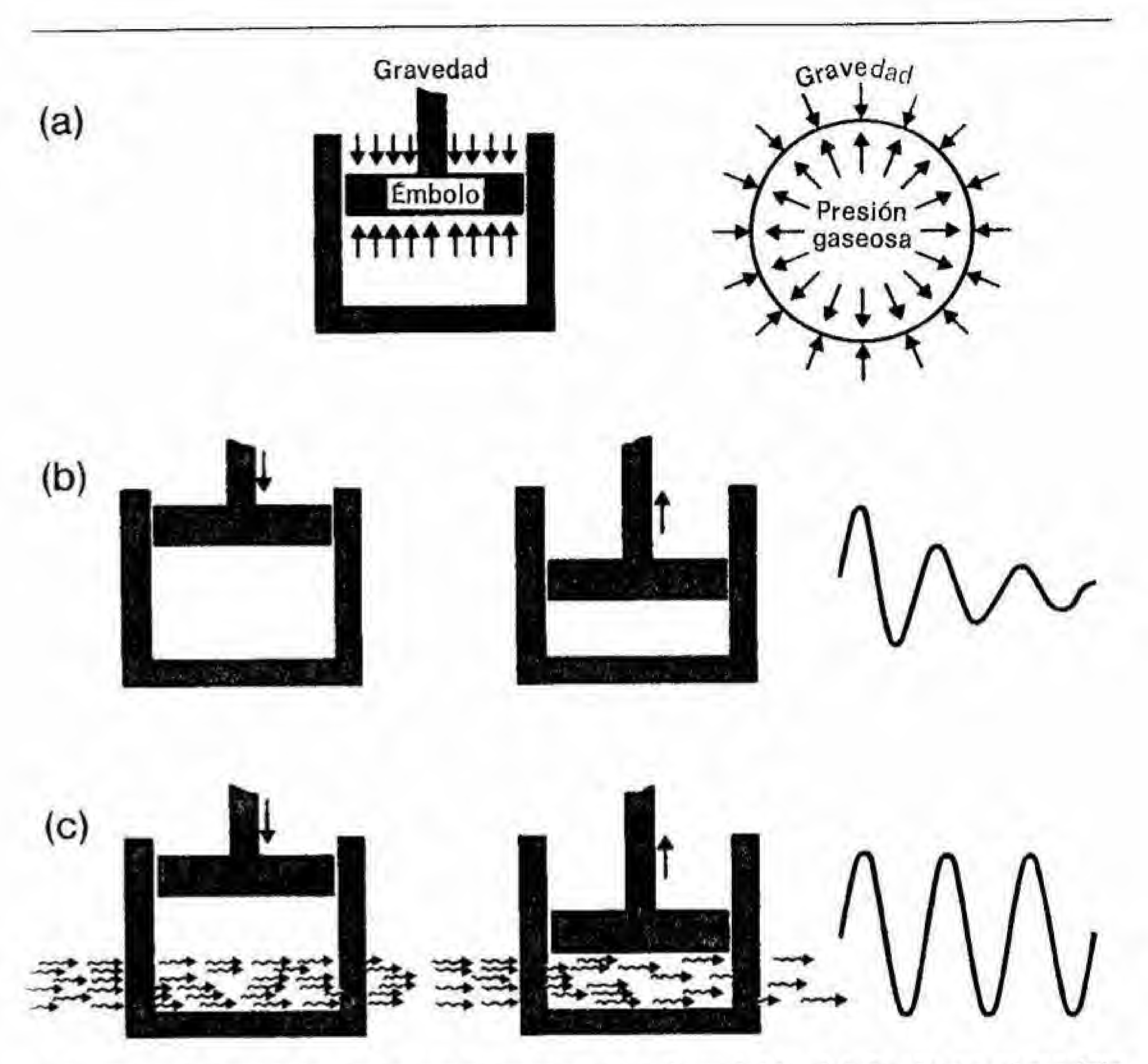


Fig. 6-5. El modelo de la olla para una estrella cefeida. (a) Tanto en el modelo como en la estrella se equilibran la gravedad y la presión gaseosa. (b) La tapadera, después de ponerse en movimiento, acaba parándose al cabo de unas cuantas oscilaciones por efecto de la fricción. (c) La radiación atraviesa el gas del modelo. Si el gas absorbe más radiación en el estado comprimido que en el de expansión, la tapadera puede mantener sus oscilaciones a pesar de las pérdidas por fricción.

tapadera presiona y que no puede escapar. El peso de la tapadera la empuja hacia abajo, pero la tapadera no puede hundirse hasta el fondo y se queda inmóvil a una determinada altura del fondo de la olla. Si la tapadera se hundiera más, comprimiría con demasiada fuerza el gas, la presión gaseosa subiría demasiado y empujaría a la tapadera de nuevo a su posición de reposo. Este estado corresponde al de equilibrio entre la gravedad y la presión gaseosa en cualquier punto del interior de una estrella.

Apliquemos ahora una fuerza y obliguemos a la tapadera a bajar un poco por debajo de su posición de reposo; al soltarla, la tapadera oscilará. Primero, al llegar por debajo de su posición de equilibrio, la presión gaseosa se hace más alta que el peso de la tapadera e impulsa a ésta hacia arriba. Pero cuando la tapadera llega por encima de la posición de equilibrio, la presión resulta demasiado baja y la gravedad vuelve a tirar de ella hacia abajo. La tapadera entre estos dos extremos no se queda inmóvil en la posición de equilibrio: una vez puesta en movimiento su inercia le hace pasar de largo de esta posición y oscila entre los dos extremos. La tapadera oscila pues alrededor de una posición media. El gas actúa como un muelle. La energía que recibe de la tapadera en la compresión se la devuelve en la expansión, y la tapadera vuelve a dar su energía al gas en la siguiente compresión. No se pierde energía. Si suponemos que el roce de nuestro modelo es despreciable, tenemos una tapadera que puede oscilar periódicamente de modo indefinido. La oscilación no es amortiguada, es decir, que la desviación máxima de la tapadera con relación a la posición media se mantiene constante. El período de la oscilación depende de las propiedades de nuestro modelo, por ejemplo, de la masa de la tapadera y de la temperatura media del gas.

Las estrellas se comportan en primera aproximación de modo parecido. Si comprimiéramos una estrella uniformemente por todos los lados y la soltáramos a continuación, la superior presión gaseosa empujaría de nuevo a la materia por todas partes hacia fuera, y ésta superaría sin detenerse la posición de equilibrio. Pero entonces la gravedad sería mayor que la presión gaseosa y atraería de nuevo el gas hacia el centro de la estrella. La estrella pulsaría. Una vez separada de su posición de equilibrio, continuaría oscilando. Puede calcularse el período de oscilación de la estrella, como el período de oscilación de nuestra olla modelo, si se conocen las características de la estrella, su masa y la distribución de temperaturas en su interior, es decir, su estructura interna.

Pero aquí hemos simplificado drásticamente tanto la estrella como la olla modelo. La tapadera tiene pérdidas por fricción, como es natural. Después del impulso inicial cubre un recorrido cada vez menor de un extremo a otro, y la oscilación se amortigua. Al cabo de un tiempo la tapadera se para (véase fig. 6-5 [b]). En el caso de una estrella, lo que amortigua la oscilación no es tanto la fricción como otros mecanismos. Puede calcularse que una estrella que empieza a oscilar artificialmente en la mayoría de los casos vuelve a la

posición de reposo al cabo de 5.000 a 10.000 oscilaciones, o sea, al cabo de unos 100 años. En cambio, las observaciones nos dicen que la estrella delta Cephei ha estado pulsando con igual intensidad desde su descubrimiento en el año 1784. ¿Dónde está el motor que impulsa las oscilaciones de estas estrellas e impide que se detengan, como hemos visto, al cabo de un tiempo relativamente breve?

Eddington señaló en su obra un posible mecanismo. Las capas exteriores de toda estrella están atravesadas por una intensa radiación procedente del centro. Para representar este fenómeno en nuestro modelo de la olla imaginemos una olla fabricada de material transparente y atravesada por una radiación que, por ejemplo, vaya de izquierda a derecha (véase fig. 6-5 [c]). El gas de la olla no es totalmente transparente, como tampoco lo es el gas estelar, y absorbe una parte de la radiación.

El gas, al principio, se calentará hasta que la diferencia de temperatura entre el gas y el mundo exterior sea tal que la olla emita hacia fuera por segundo tanta energía como la que absorbe el gas al captar una parte de la radiación.

Partamos de la posición de equilibrio de la tapadera y empujémosla un poco hacia abajo. El gas se comprime y aumentan la presión y la temperatura. En principio podemos imaginar sólo dos casos. El gas en el instante de máxima compresión absorbe o más energía o menos energía. Consideremos el primer caso. Si la absorción aumenta en la compresión, cuando la tapadera está debajo absorbe más energía de radiación que en la posición de descanso. Esta energía adicional calienta más el gas y la presión sube más. La sobrepresión empuja la tapadera hacia arriba con más fuerza, por encima de la posición inicial de descanso. Pero entonces el gas está más enrarecido y más frío que en la posición de descanso y, por tanto, absorbe menos energía. El gas se enfría, la presión gaseosa disminuye, la tapadera baja de nuevo hacia abajo con un impulso que la mantiene en movimiento a pesar de la fricción.

Lo que funciona con el modelo de la olla es bueno también para la estrella. Si en una capa de una estrella la materia tiene también la propiedad de absorber más radiación cuando está comprimida y de transformarla en calor, la radiación que atraviesa la estrella puede excitar en ella oscilaciones. Porque cuando la estrella está comprimida la radiación dirigida hacia fuera procedente de su interior no puede atravesar con tanta facilidad las capas exteriores. El gas se calienta e hincha la estrella. Después de la fase de compresión viene una fase de expansión. Cuando la expansión es máxima,

la materia es más transparente. Puede transportar fuera más energía que antes, el interior se enfría y la estrella se encoge de nuevo; una nueva compresión sigue a la expansión. La materia estelar actúa como una válvula para la radiación dirigida hacia el exterior, abriéndose y cerrándose según el ritmo de la pulsación.

Eddington había ya descrito este mecanismo en 1926, y ahora viene lo trágico. En la época de Eddington todavía no se conocían muchos detalles sobre el paso de la radiación a través del gas estelar, y lo que se sabía apoyaba la idea contraria, a saber, que la materia estelar tiene la propiedad de aumentar su transparencia al comprimirse. Pero entonces intervienen otros efectos contrarios a los ya citados. El mecanismo de absorción actúa precisamente en la dirección equivocada, no estimula la oscilación sino que la amortigua. Esto explica que el mismo Eddington dejara de lado su mecanismo y que, hasta su muerte, intentara descubrir nuevas explicaciones para las pulsaciones de las estrellas cefeidas.

ZHEVAKIN ESTUDIA DE NUEVO UNA ANTIGUA IDEA

Hacia los años cincuenta se había investigado mucho mejor la transparencia de la materia estelar. Se sabía que las ideas de Eddington eran correctas en las capas profundas de las estrellas. En cambio, en las capas exteriores de una estrella puede suceder perfectamente que la materia al comprimirse se haga menos transparente. Y esto sucede, precisamente, cuando la temperatura superficial de una estrella se sitúa hacia los 5.300 grados. Zhevakin, en un trabajo del año 1953, fundamental, pero durante mucho tiempo inadvertido, demostró que en una estrella cefeida basta el efecto estimulante sobre las oscilaciones de la transparencia de las capas exteriores para compensar toda la amortiguación del resto de la estrella y obligarla a oscilar. Por tanto, el mecanismo de la válvula radiante de Eddington mantiene en oscilación a las estrellas cefeidas a pesar del efecto amortiguador.

Cuando en 1963 nuestro grupo de Munich observó que la trayectoria evolutiva de nuestra estrella de siete masas solares cruzaba cinco veces la banda de estrellas cefeidas, se planteó la posibilidad de repetir los viejos cálculos efectuados en 1960 por Norman Baker y yo en Munich, cálculos que permitían demostrar si una estrella entra o no en oscilación. Descubrimos que cada vez que la trayectoria evolutiva cruzaba la banda de las cefeidas, los modelos estelares presentaban oscilaciones y que su período de oscilación se correspondía muy bien con los períodos observados. Por tanto, interpretamos el hecho de que las estrellas cefeidas y sus oscilaciones podían integrarse sin problemas en el esquema de evolución estelar como indicación de que todo era correcto. Siempre que una estrella en sus evoluciones por el diagrama HR pasa por la banda de las cefeidas, oscila. Cuando abandona la banda, el mecanismo de excitación de las capas exteriores resulta insuficiente y la estrella deja de oscilar.

Martin Schwarzschild dijo en una ocasión lo siguiente: ser cefeida para una estrella es lo mismo que para una persona tener un sarampión. Cuando está en esta fase, el hecho es fácilmente observable, pero más tarde, cuando todo ha pasado, es imposible saber si tuvo o no la enfermedad.

VII. ESTRELLAS MUY EVOLUCIONADAS

¿Qué le sucede a nuestra estrella de siete masas solares cuando ha agotado todo el helio de su centro? ¿Continúa pasando de crisis energética en crisis energética? ¿Continúa calentándose su núcleo hasta que alcanza los 300 millones de grados y entra el carbono en ignición? A partir de ahora se hace muy difícil seguir la estrella con el computador. Tras agotarse en su centro el helio, aumentan allí la densidad y la temperatura; todo señala hacia la combustión del carbono. Pero entonces aparecen las dificultades.

LOS NEUTRINOS ENFRÍAN Y LAS CAPAS ACTIVAS PARPADEAN

Si la densidad y la temperatura en el centro de una estrella alcanzan un nivel suficiente, pueden nacer dos nuevas partículas elementales al aproximarse entre sí un cuanto de luz y un electrón (véase fig. 7-1). Una de las partículas ya la conocemos, es el neutrino. La segunda partícula está muy emparentada con la anterior, se llama *antineutrino* y sus propiedades son muy parecidas a las del neutrino. Sobre todo tiene también la propiedad de atravesar sin obstáculos la materia estelar. En el nacimiento del par neutrino-antineutrino se gasta energía de los padres, es decir, del electrón y del cuanto de luz. Esta energía queda oculta en los mellizos recién nacidos y escapa sin problemas del interior de la estrella hacia el espacio. Cuando la estrella se contrae en su centro intentando alcanzar la temperatura necesaria para la combustión del carbono, se crean pares neutrino-antineutrino cada vez más numerosos que se llevan

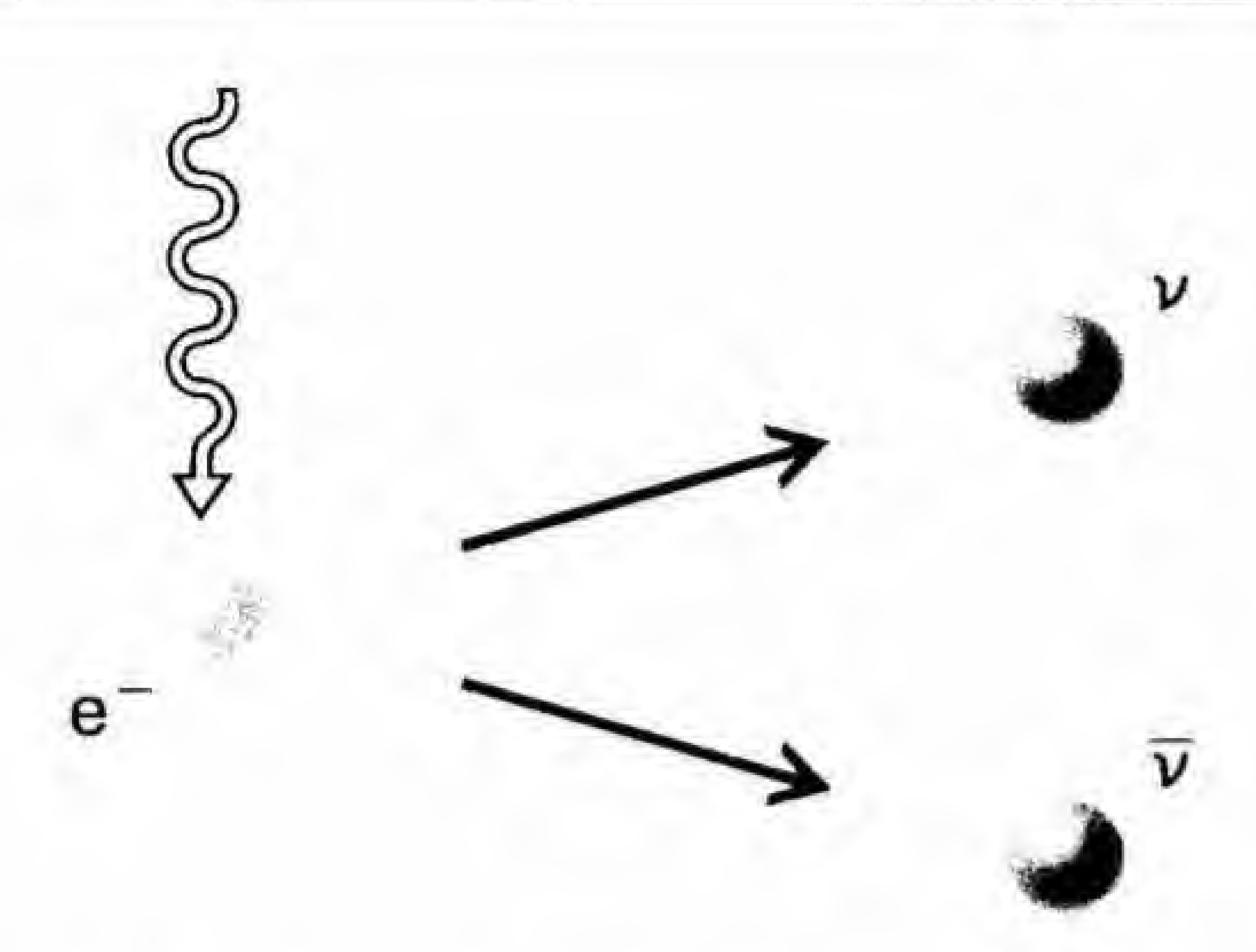


Fig. 7-1. Cuando se tienen temperaturas de centenares de millones de grados, el encuentro de un electrón (esfera gris) y de un cuanto de luz (flecha ondulada) puede crear un neutrino y un antineutrino.

energía y enfrían el interior de la estrella, impidiendo así la ignición del carbono o por lo menos retrasándola. Cuando se inicia finalmente la fusión del carbono, esta reacción, tanto tiempo aplazada, tiene lugar de modo explosivo. Es posible que reviente toda la estrella. Para saberlo exactamente habría que llevar los cálculos hasta este estadio. Pero entonces se plantean nuevas dificultades.

En los estadios avanzados de la estrella, cuando la energía se genera en dos capas, una que quema hidrógeno y otra que quema helio, las reacciones nucleares no proceden al mismo ritmo. La producción de energía aumenta y disminuye en el curso de los siglos. A veces la capa que quema hidrógeno cubre por sí sola las necesidades lumínicas de la estrella, y luego se encarga de producir toda la energía la capa que quema helio. En las capas que generan solas la energía, se crean zonas de convección que mezclan parte de la estrella y luego desaparecen. Para poder seguir con mayor precisión estos procesos en el computador hay que seguir los recrudecimientos y extinciones de la combustión en las dos capas activas, y quizá se precisen cientos de modelos estelares para estudiar un período de tiempo que sólo durará cien años en la vida real de una estrella. Quien quiera seguir la evolución de la estrella a lo largo de unos cuantos millones de años se enfrenta, pues, con una tarea

prácticamente irrealizable. Todos los grupos que trabajan el tema de la evolución estelar han renunciado hasta ahora a intentarlo.

Aunque se pudiera resolver este problema se plantearían más dificultades. Las combustiones nucleares se vuelven todavía más complicadas. Cuando dos núcleos atómicos de carbono chocan entre sí y reaccionan, el producto final de esta reacción no es en absoluto seguro. Puede aparecer magnesio u oxígeno, neón o sodio, y todos estos átomos se producen con una determinada relación de frecuencias. La estructura química de la estrella se complica cada vez más. Hay que añadir a esto que la fusión de distintos elementos superiores tiene lugar casi a la misma temperatura. Esto significa que en el mismo punto de la estrella pueden tener lugar casi simultáneamente varias combustiones distintas a la vez. Ante todo esto los constructores de modelos estelares han renunciado de momento a continuar su tarea. El arte de simular la vida de una estrella en el computador electrónico ha llegado aquí a su final. Ignoramos la continuación real y sólo podemos imaginar lo que ahora sucede.

LA ENANA BLANCA DENTRO DE LA GIGANTE ROJA

Si el computador es incapaz de decirnos qué destino espera ahora a la estrella, podemos mirar directamente el cielo y preguntarnos si la observación da pistas sobre la posterior evolución del astro. ¿Qué tenemos que buscar? ¿Cómo son los últimos modelos estelares que acaba de sacar el computador?

Durante la evolución que ha llevado a nuestra estrella de siete masas a lo largo de su trayectoria desde la secuencia principal hasta las fases finales calculables con el modelo, la densidad ha subido considerablemente, primero después de agotarse el hidrógeno, luego después de agotarse el helio del centro. Si al principio, cuando nuestra estrella estaba todavía en la secuencia principal, la densidad del centro era inferior a una décima parte de la densidad del agua, pasado un tiempo después del agotamiento de su helio la densidad del centro ha subido a diez toneladas por centímetro cúbico. Estas densidades sólo se conocen en las enanas blancas.

De hecho, en el interior de nuestra estrella evolucionada se oculta un núcleo de densidad muy alta. Este núcleo contiene algo más de una masa solar. Su radio corresponde al de una enana blanca de masa igual. Todas sus características se parecen a las de una enana blanca, con la única diferencia de que está rodeada por una

gigantesca envoltura gaseosa de masa seis veces la del Sol. Esto es válido también para todas las gigantes rojas y para las supergigantes, todavía más brillantes, que han consumido ya el helio de su centro. Todas tienen núcleos densos como nuestra estrella de siete masas solares. En el corazón de una gigante roja se oculta siempre una enana blanca. Si pudiéramos arrancar la capa que descansa de modo suelto sobre el núcleo denso, tendríamos una estrella absolutamente indistinguible de la enanas blancas que están libres por el Universo. ¿Puede una estrella evolucionada expulsar su envoltura y transformarse en una enana blanca, o sea, en una estrella como la acompañante de Sirio?

Antes de contestar esta pregunta dejaremos un momento las estrellas de gran masa y volveremos a las de tipo solar. ¿Hasta dónde podemos llegar con nuestros modelos calculados?

EL FUTURO LEJANO DEL SOL

Ya hemos dicho que un inicio muy rápido de la combustión del helio provocaba dificultades especiales en la simulación con el computador del curso evolutivo de estrellas de tipo solar. Pero Schwarzschild y su colaborador Richard Härm, utilizando el método de Henyey, pudieron seguir en 1962 el *"helium-flash"*, el relámpago del helio, como se llama a la rápida combustión del helio. ¿Qué pasa en la estrella? Voy a utilizar a continuación los cálculos efectuados por Hans-Christoph Thomas en la tesis que presentó en Munich en 1967.

Recordemos lo siguiente: nuestra estrella de tipo solar está situada en la parte superior derecha del diagrama HR (véase fig. 5-3); hace tiempo que quemó el hidrógeno de su centro. En la región central ha aparecido un globo de helio, sobre cuya superficie la combustión del hidrógeno avanza cada vez más en dirección a la envoltura rica en hidrógeno. La envoltura en sí es muy extensa, porque mientras tanto la estrella se ha convertido en una gigante roja (véase fig. 5-2 [d]).

El núcleo de helio va incorporando continuamente más masa, porque en su superficie el hidrógeno se transforma en helio, y al mismo tiempo aumentan la densidad y la temperatura del centro. Pero pronto en esta región los cuantos de luz y los electrones crean también pares de neutrinos, y una parte de la energía del interior escapa directamente con los neutrinos. La región central se enfría gracias a los neutrinos. Normalmente el centro de una estrella es la parte más caliente; en cambio, ahora, debido al enfriamiento por neutrinos, el punto central de la estrella tiene una temperatura inferior a la de la capa activa, que está todavía en la esfera de helio, pero a una determinada distancia del centro. Ésta es la zona más caliente, y allí empieza pronto la ignición del helio. La fusión del helio tiene lugar con densidades elevadas y en consecuencia la combustión es muy intensa. Se produce el relámpago de helio. La ignición del helio avanza con mucha rapidez, pero no por esto hemos de creer que si el Sol llegara a este punto se notaría mucho el proceso desde fuera. El inerte cuerpo solar reacciona muy poco al aumento pasajero de la producción de energía en su interior. Durante doscientos años la combustión del helio es muy fuerte, luego sigue un período de combustión nuclear uniforme.

Sin embargo, aparecen de nuevo todos los achaques de la vejez propios de una estrella evolucionada. Las capas en ignición queman irregularmente y obligan al computador a tener en cuenta procesos que siguen su curso en períodos de cien años. Se hace imposible salvar con los cálculos intervalos de millones de años o más. Y, sin embargo, han de transcurrir todos estos años para que empiece a notarse la evolución posterior.

También aquí hemos llegado al punto final de nuestro arte. Sólo nos queda confiar en la observación de estrellas que hayan superado ya esta fase evolutiva y que puedan señalarnos el camino a seguir. Para ello podemos recurrir al diagrama HR del cúmulo globular de la figura 2-9. Recordémoslo: observábamos en este cúmulo estrellas que están recorriendo su trayecto desde la secuencia principal al dominio de las gigantes rojas. Sabemos que estas estrellas no han encendido todavía su helio. Los cálculos demuestran que durante la ignición del helio la estrella se mantiene en la parte superior derecha del diagrama; por tanto, deducimos que las estrellas que forman la rama horizontal del diagrama han encendido ya su helio. Pero los modelos de computador que describen la estrella después del relámpago de helio no indican en absoluto que la estrella se dirija hacia la izquierda por la rama horizontal. Las estrellas se quedan en la derecha con las gigantes rojas. Pero ¿cómo llegan las estrellas en la naturaleza a la rama horizontal?

Las primeras ideas para resolver este problema se deben a John Faulkner, un discípulo de Hoyle que ahora trabaja en Santa Cruz de California. De hecho, puede hacerse un pequeño experimento con los modelos de computador de las estrellas de tipo solar

que queman helio. Si eliminamos artificialmente de su superficie algo de masa y dejamos que el computador calcule la estructura de este modelo parcialmente amputado, el modelo ya no se sitúa a la derecha del diagrama HR, sino cerca de la rama horizontal. No es preciso eliminar toda la envoltura de hidrógeno que rodea el núcleo de helio; basta con una operación parcial. ¿Hemos encontrado con este experimento informático la pista de la verdad? ¿Es posible que las estrellas de tipo solar pierdan masa de su superficie durante el tiempo en que son gigantes rojas, instalándose luego, aligeradas de

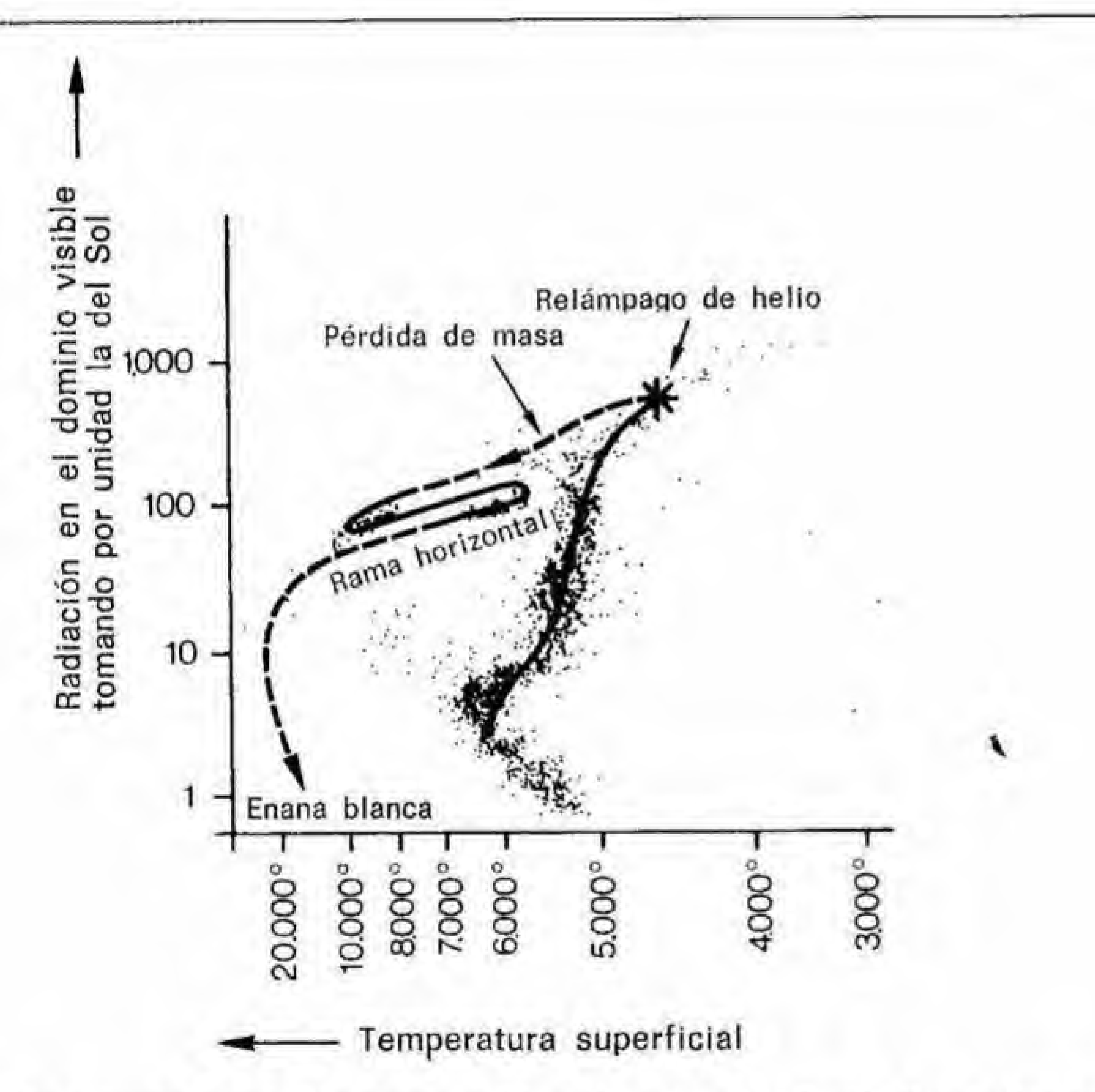


Fig. 7-2. Trayectoria evolutiva esquemática de una estrella de tipo solar en el diagrama HR. La estrella después de pasar por la secuencia principal se convierte en una gigante roja, como indicaba la figura 5-4. Su helio entra entonces en ignición (relámpago de helio). La explosión proyecta al espacio tanta cantidad de su materia que desaparece una parte esencial de la envoltura de la gigante roja y la estrella llega así a la rama horizontal del diagrama. Luego se convierte probablemente en una enana blanca. Se han dibujado como comparación en el diagrama las estrellas del cúmulo estelar M3 de la figura 2-9.

una parte de su envoltura gaseosa, en la rama horizontal del diagrama HR, precisamente allí donde los diagramas de los cúmulos globulares muestran estrellas que al parecer ya han puesto en ignición su helio? Estudiemos la figura 7-2. ¿Es éste el futuro lejano del Sol? ¿Pierde en su estado de gigante roja tanta masa, que son expulsadas al espacio partes considerables de su envoltura, y la estrella acaba instalándose para largo tiempo en la rama horizontal del diagrama HR? Eso parece. En tal caso, más tarde o más temprano toda la masa del Sol se concentrará en su núcleo de enana blanca, y al final, quizá después de expulsar su envoltura en una fase posterior, nuestro mismo Sol se convertirá en una enana blanca.

Los modelos de computador para estrellas muy evolucionadas han planteado la posibilidad de que las estrellas pierdan masa, y ahora podemos buscar en el cielo datos concretos que apoyen esta posibilidad. Hay una plétora de indicios al respecto, no sólo en las estrellas muy evolucionadas, sino también en una estrella de la secuencia principal tan inofensiva como nuestro Sol actual.

PETER APIANUS, LUDWIG BIERMANN Y LOS COMETAS

El primero enseñó astronomía durante el siglo XVI en Ingolstadt, se llamaba en realidad Peter Bienewitz y procedía de Sajonia. El segundo vivió en Munich durante los últimos decenios de su vida y fue mi predecesor en la Sociedad Max Planck. La historia que les trae a cuento se ocupa de una notable propiedad de los cometas y finaliza con la cuestión de la pérdida de masa del Sol.

Los cometas son cuerpos formados por menos de una millonésima parte de la masa de la Tierra. Se mueven alrededor del Sol en órbitas elípticas alargadas. El más conocido de todos es el cometa Halley, cuya órbita, que recorre en unos 75 años, le ha llevado el año 1986 de nuevo cerca del Sol. Cuando los cometas se acercan al Sol vaporizan masas de gas que probablemente permanecían congeladas sobre sus núcleos en forma de hielo o de nieve. Además, se liberan también partículas de polvo que estaban mezcladas con la nieve. El gas y el polvo no se alejan ahora del cuerpo cometario uniformemente y en todas direcciones, sino que forman la cola dirigida que presta su aspecto peculiar a los cometas. En realidad, el cometa proyecta dos colas: una cola de polvo, por la que escapan las partículas de polvo, y una cola de gas. La presión de la luz solar impulsa las partículas de polvo en una dirección contraria a la del

Sol, a menudo ligeramente curvada. La cola de polvo no nos interesa ahora. Son las moléculas de gas las que nos proponen el enigma. Estas moléculas forman una cola rectilínea y salen del cometa a gran velocidad, alcanzando a veces los 100 kilómetros por segundo.

El sorprendente aspecto de los cometas (los cuales no deben confundirse con las estrellas fugaces que atraviesan rápidamente el cielo) ha conmovido al hombre en todas las épocas (véase fig. 7-3). En la Edad Media los cometas se consideraban presagios de desgracia, síntomas de guerras, hambres y pestilencias. Sin embargo, los cometas siempre han estimulado el pensamiento científico. Ya en la primera mitad del siglo XVI el profesor de matemáticas Apianus había descubierto que la brillante cola de los cometas está dirigida siempre en dirección contraria al Sol. Un cometa no se desplaza por el espacio llevando a remolque su cola gaseosa en su misma órbita. Sea cual fuere la dirección del cometa, la dirección de la cola es siempre opuesta a la del Sol (véase fig. 7-4). Cuando el cometa se aleja del Sol empuja su cola delante suyo. La existencia de una cola que apunta lejos del Sol y las elevadas velocidades con que se aleja del Sol el gas procedente del cometa hicieron pensar ya en el siglo pasado que debe existir una fuerza contraria a la de la gravedad que empuja a la materia fuera del Sol.

La única fuerza conocida que puede exlicar el fenómeno es la presión ejercida por la luz del Sol sobre las partículas de la cola del cometa. Sin embargo, el astrónomo Karl Wurm (1899-1975) demostró en el año 1943, mientras trabajaba en Hamburgo, que la presión de radiación es demasiado débil para explicar las grandes velocidades de las colas de gas.

Pero las altas velocidades se habían observado y exigían una explicación. La causa de que las partículas gaseosas se alejen siempre del Sol ha de residir en el Sol. Ludwig Biermann (1907-1986) imaginó en 1950 la existencia de un flujo continuo de partículas procedentes del Sol que atraviesan nuestro Sistema Solar arrastrando consigo las moléculas vaporizadas del núcleo cometario. Se sabía ya que algunas erupciones solares proyectaban al espacio nubes de gas; estas corrientes de gas causan, por ejemplo, las auroras polares. Biermann proponía, sin embargo, que existe un viento continuo



Fig. 7-3. El cometa Mrkos del año 1957 presenta una cola gaseosa, recta y ▶ opuesta al Sol, y una cola de polvo, difusa y curvada hacia la izquierda.

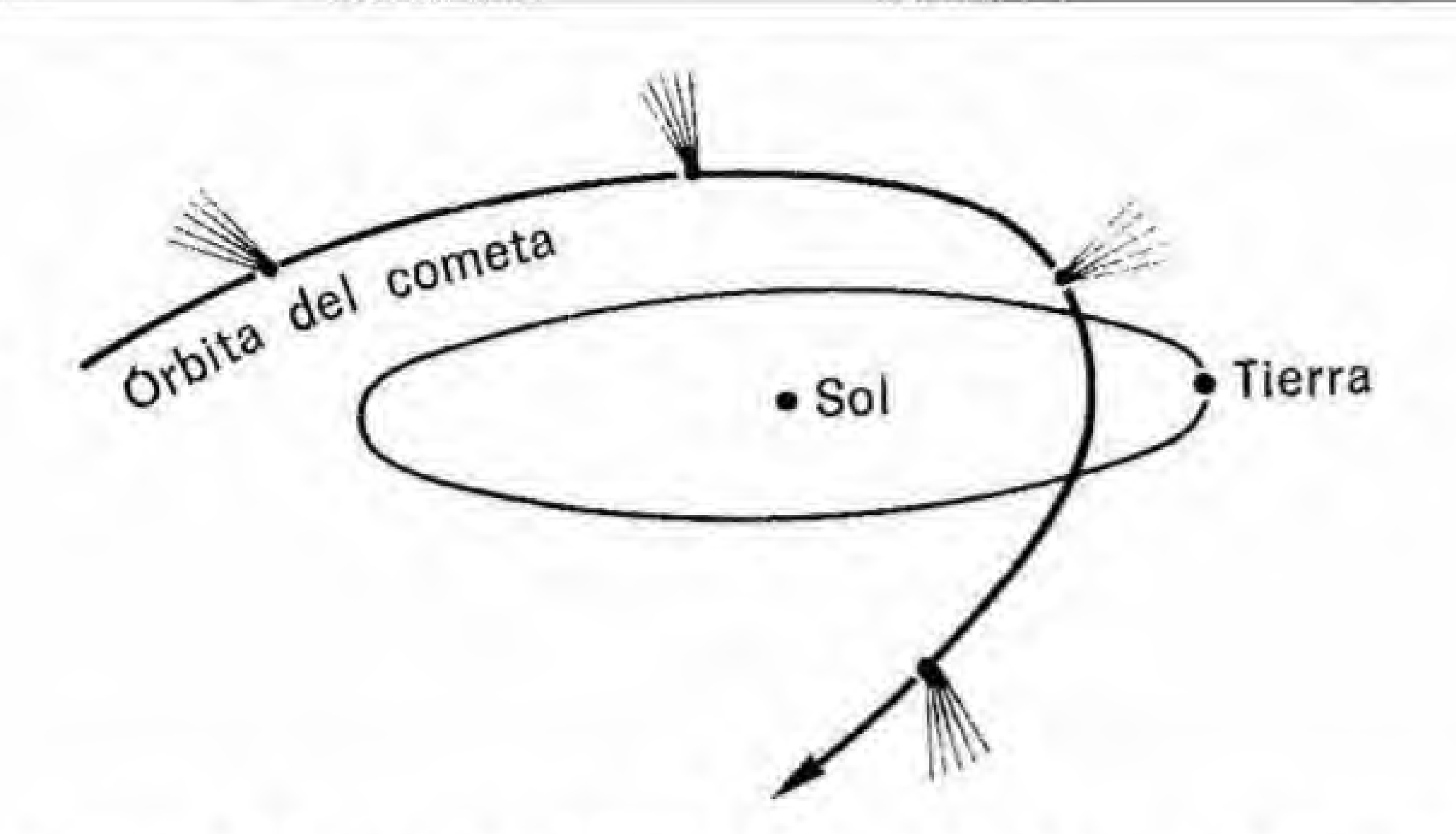


Fig. 7-4. El cometa al avanzar por su órbita mantiene siempre la cola gaseosa en dirección opuesta a la del Sol.

de partículas cargadas independiente de las erupciones solares. Estas partículas cargadas eléctricamente —principalmente núcleos de hidrógeno— arrastrarían consigo los componentes cargados eléctricamente de los gases liberados por el núcleo del cometa, mientras que las moléculas sin carga permanecerían en la cabeza del cometa. Más tarde, los satélites confirmaron el viento solar que Biermann había predicho para explicar la dirección de las colas cometarias, y las sondas espaciales midieron su intensidad y su dirección. Esto permitió contestar la pregunta planteada por el descubrimiento de Apianus: por qué la cola gaseosa de los cometas está dirigida siempre en dirección contraria al Sol.

Por tanto, el Sol pierde materia continuamente. ¿Invalida esta afirmación todos nuestros cálculos evolutivos en los cuales supusimos que la estrella conserva constante su masa inicial? ¿Proporciona este fenómeno una salida a la paradoja todavía inexplicada de los neutrinos?

Sabemos, actualmente, que el Sol pierde hoy en día cada año 10 billones de toneladas de materia en forma de viento solar proyectado al espacio. Por grande que sea, esta cifra no supone una pérdida apreciable de masa solar a lo largo de los miles de millones de años que ha durado la evolución de nuestra estrella. Parece ser que el Sol ha conservado su masa durante la fase de permanencia en la secuencia principal, a pesar de emitir constantemente vientos de partículas gaseosas en los cuales las colas de los cometas se orientan como banderas al viento de la Tierra.

LAS ESTRELLAS EVOLUCIONADAS PIERDEN MASA

El Sol pierde una cantidad reducida de masa durante su estancia en la secuencia principal. En cambio, las estrellas evolucionadas pierden más masa. De la superficie de muchas gigantes rojas fluye gas hacia el espacio. Todavía no entendemos el correspondiente mecanismo. Todavía no disponemos de una teoría exacta del viento solar. Pero se puede medir la velocidad de la materia que escapa de la estrella y evaluar la masa que ésta pierde. Según estas evaluaciones, algunas estrellas pierden masa a un ritmo diez millones de veces más rápido que el Sol. Generalmente la pérdida de masa es tan importante que bastan 100 millones de años para que la estrella pierda en el espacio una parte notable de su masa total.

No sólo pierden masa las gigantes rojas. También escapa al espacio el gas de estrellas calientes de gran masa que acaban de abandonar la secuencia principal. Las velocidades del viento son en estos casos especialmente elevadas. A menudo, la materia escapa a velocidades de 2.000 a 3.000 kilómetros por segundo.

Sin embargo, las elevadas pérdidas de masa de las estrellas evolucionadas no nos obligan a revisar nuestras ideas sobre la evolución estelar. Para una estrella evolucionada de gran masa un período de cien millones de años es relativamente largo, mucho más largo que la fase ya discutida de ignición y combustión total del helio en su región central. La pérdida de masa sólo tiene importancia en el caso de estrellas de tipo solar que se han convertido en gigantes rojas. Pero, precisamente entonces, esta pérdida nos permite explicar las estrellas de los cúmulos estelares situadas en la rama horizontal.

Antes de continuar quisiera ofrecer otro ejemplo sobre la pérdida de masa de estrellas evolucionadas. Se trata de la estrella Mira. Está situada en la Ballena. David Fabricio, párroco de Frisia oriental, descubrió en 1596 que esta estrella sólo puede observarse a simple vista en algunas ocasiones, y que luego permanece invisible durante largo tiempo. Hoy sabemos que Mira cambia de brillo con un período de once meses. Su luz en el mínimo es 600 veces más débil que en el máximo. Mira es una gigante roja, es decir, una estrella evolucionada. Muchas gigantes rojas presentan estas oscilaciones de brillo cuyo origen no está todavía explicado. Es seguro que el mecanismo es distinto del de las estrellas cefeidas, que ya hemos discutido. Sin embargo, no vamos a estudiar ahora la variabilidad de esta es-

trella evolucionada. Lo que nos interesa en su acompañante. Cuando Mira está en su mínimo se hace visible una estrella acompañante, cuya luz en otros momentos se pierde en el brillo de la gigante roja: es una enana blanca. Recordemos que también alrededor de Sirio gira una enana blanca. En el caso de Mira han de pasar 261 años para que la enana complete su órbita alrededor de la gigante.

El astrónomo surafricano Brian Warner descubrió que la luz de la enana blanca parpadeaba. Sabemos que las enanas blancas son estrellas estables que apenas varían. ¿A qué se debe la inquietud de la acompañante de Mira? Warner dijo que si Mira expulsa materia al espacio como la mayoría de gigantes rojas, su acompañante se moverá dentro del viento estelar de Mira y su gravedad atraerá una parte de los gases de la estrella mayor sobre su superficie. El gas chocará contra la superficie a alta velocidad porque allí la gravedad es muy intensa. El choque producirá calor, y el gas caliente al precipitarse sobre la superficie contribuirá de modo importante al brillo de la estrella enana. Irregularidades en la corriente de gas motivan las oscilaciones de la energía emitida que nosotros medimos. Brian Warner no necesita que Mira pierda cantidades muy grandes de masa para explicar la luminosidad de la enana blanca y su fluctuación. También en este caso parece ser que la pérdida de masa tiene poca importancia para la evolución de la estrella Mira.

Así pues, las pérdidas de masa observadas en las estrellas explican la llegada a la rama horizontal del diagrama HR de las estrellas de tipo solar. Pero esto no basta para saber si una estrella de gran masa en el curso de su evolución tiene tales pérdidas que dejan al descubierto la enana blanca oculta en su interior, y ésta es la cuestión que nos planteamos de entrada. Afortunadamente un fenómeno celeste confirma la posibilidad de que las estrellas puedan expulsar más masa en períodos de tiempo más breves.

LA ENANA BLANCA QUEDA LIBRE

Si se conoce el lugar exacto, basta un pequeño telescopio para descubrir en la constelación de la Lira un pequeño anillo brillante: la nebulosa anular de la Lira. Actualmente se conocen 700 formaciones de este tipo. A veces aparecen en el telescopio como discos luminosos parecidos a los discos planetarios y por ello recibieron el nombre de *nebulosas planetarias* (véase fig. 7-5, en las páginas centrales del libro). Pero estos cuerpos no tienen nada que ver con

los planetas de nuestro Sistema Solar, pues están tan alejados como las estrellas. Son, en realidad, nebulosas brillantes de gas que rodean una estrella de alta temperatura. Son masas gaseosas dispuestas más o menos en forma de globo vacío, con una estrella caliente en su interior, cerca del centro. El gas brilla porque recibe los rayos de la estrella central. Se observa que la envoltura gaseosa se expande. Las velocidades son de unos 50 kilómetros por segundo. Es evidente que una estrella ha expulsado de golpe gas de su superficie. La materia brillante de la envoltura gaseosa contiene del 10 al 20 % de la masa del Sol, es decir, una cantidad de materia que ya no es despreciable comparada con la masa de una estrella.

No sabemos por qué motivo la estrella ha expulsado esta materia, ni qué mecanismo es responsable de esta pérdida de masa. Sólo vemos que el hecho ha tenido lugar realmente. Pero vemos también algo más. Si observamos con mayor detalle la estrella central, descubrimos que sus propiedades recuerdan las de una enana blanca. La temperatura de su superficie es muy elevada, y la estrella en sí es muy pequeña. Al parecer somos testigos de la expulsión de la envoltura de una gigante roja y de la aparición de una enana blanca en su interior. Es muy posible que la estrella haya expulsado materia desde hace más tiempo, pero que ahora, al aparecer la enana blanca, la elevada temperatura superficial de ésta excite y haga brillar las masas de gas que todavía se encuentran próximas a ella. Es probable, pues, que las nebulosas planetarias nos permitan presenciar el nacimiento de una enana blanca.

Sin embargo, parece que no siempre las estrellas se liberan de modo inofensivo de sus capas exteriores ricas en hidrógeno; en algunos casos la estrella elimina su envoltura de forma explosiva.

LA ESTRELLA DE HARTWIG EN LA NEBULOSA DE ANDRÓMEDA

A veces el progreso astronómico puede fecharse al día y a la hora, concretamente cuando se basa en una única observación astronómica. Son en cierto modo las horas estelares de la investigación estelar. Una de estas horas coincidió con la noche del 31 de agosto de 1885. Ernst Hartwig, un observador de 34 años, nacido en Frankfurt, dirigió el telescopio del observatorio de Dorpat hacia la nebulosa de Andrómeda. La nebulosa de Andrómeda es una nebulosa espiral, y Hartwig en aquella época ignoraba qué era en

realidad aquella formación; tendrían que transcurrir todavía 35 años para saberlo. Cuando Hartwig observó la nebulosa con su telescopio, se fijó en una estrella brillante. Estaba cerca de la zona más brillante de aquella formación nebulosa, cerca del núcleo de Andrómeda. La estrella unos días antes no estaba allí.

A veces, la luminosidad de las estrellas aumenta para disminuir más tarde: este hecho no era ninguna novedad. Trataremos luego este fenómeno. Lo sorprendente era que aquella estrella pertenecía al parecer a la nebulosa de Andrómeda, y la sensación se produjo en 1920 cuando se descubrió que las nebulosas espirales o las galaxias, como ahora se llaman, son conjuntos de centenares de miles de millones de estrellas, tan alejadas en el espacio que su luz aparece en casi todos los telescopios como un velo nebuloso. La galaxia de Andrómeda sólo se resuelve en estrellas individuales con los mayores telescopios; ya citamos este hecho en la introducción. La galaxia de Andrómeda está tan alejada de nosotros que su luz tarda dos millones de años en llegar. Por tanto, el fenómeno que vio Hartwig, el 31 de agosto de 1885, había tenido lugar hacía dos millones de años. La estrella aparecía tan brillante en el cielo, a pesar de la gran distancia, porque su brillo se había hecho 10.000 millones de veces más intenso que el de nuestro Sol. Hartwig había presenciado, por tanto, una explosión de luz de increíble potencia, mucho más intensa que los aumentos de luz observados ocasionalmente en las estrellas y llamados *fenómenos nova*. Lo que Hartwig vio en la nebulosa de Andrómeda se llama actualmente *supernova*.

Hartwig abandonó, al cabo de poco tiempo, Dorpat y emprendió un nuevo trabajo. Había fallecido en Bamberg un ciudadano acomodado, Karl Remeis, legando a la ciudad una considerable fortuna de 400.000 marcos de oro, con la condición de que se construyera un observatorio y lo mantuviera. Hartwig se encargó de la planificación y dirección del Instituto hasta los años veinte*.

* Karl Remeis legó otra parte de su fortuna a la ciudad de Bamberg, con la condición de destinarla al cuidado de "personas solteras del sexo femenino". El resto de la fortuna se perdió por culpa de la inflación después de la I Guerra Mundial, a excepción de la parte legada a la astronomía, invertida en terrenos, edificios, instrumentos y libros, por lo que la ciudad de Bamberg no pudo seguir dando cumplimiento a este apartado del testamento de Remeis. Parece como si en el subconsciente profundo de los jóvenes astrónomos que han trabajado en Bamberg, como yo mismo, que pasé allí seis años de mi vida, persista una especie de sentimiento de culpabilidad por haber aprovechado una parte del legado de Remeis, sin que la ciudad de Bamberg pueda hacer lo mismo con el resto. Y quizá tenga relación con lo anterior, el que muchos jóvenes astrónomos que trabajaron en Bamberg se casaron allí, contribuyendo a su modo a cumplir la otra parte del testamento de Remeis.

El lector me permitirá que me detenga un momento en este punto. Wolfgang Strohmeier fue nombrado, en 1954, director del observatorio de Bamberg. Yo era su ayudante. Repasamos entonces la antigua correspondencia de este Instituto. Descubrimos dos cartas dirigidas a Hartwig, escritas ambas durante la I Guerra Mundial. La primera procedía de un joven soldado que ya se había escrito con Hartwig. Era una carta desesperada, porque aquel joven, cuyo único deseo era convertirse en astrónomo, había sufrido un derrame, estaba medio ciego en el hospital y temía perder la vista. Firmaba la carta Hans Kienle (1895-1975), quien después dirigió el observatorio de Gotinga y fue maestro de muchos y conocidos astrónomos: Ludwig Biermann, Otto Heckmann, Martin Schwarzschild y Heinrich Siedentopf son unos cuantos nombres.

La segunda carta procedía de un joven de Sonneberg, en la Turingia, que también quería ser astrónomo, pero cuyo padre le había sacado de la escuela contra su voluntad. Una carrera de comercio le prepararía para hacerse cargo de la fábrica paterna. Pero la empresa había quebrado por culpa de la guerra y el joven se sentía en libertad y ofrecía sus servicios a Hartwig; estaba incluso dispuesto a trabajar durante un tiempo sin remuneración, con tal de que pudiera hacerlo en un observatorio astronómico. Hartwig le había aceptado y apoyado. Más tarde, aquel astrónomo amateur concluyó sus estudios. Era Cuno Hoffmeister (1892-1968), quien más tarde fundaría el observatorio de Sonneberg. Sus observaciones de un cometa en el año 1942 proporcionaron a Biermann la clave para el descubrimiento del viento solar. Dos estrellas variables, de los muchos miles que Hoffmeister descubrió, causaron sensación. La primera, BL Lacertae, es el primer ejemplo de una clase entera de objetos totalmente inexplicados situados en los espacios intergalácticos. La otra, a la que volveremos más tarde, se ha convertido en uno de los objetos más bellos de la astronomía de rayos X, aunque Cuno Hoffmeister no haya podido ya saberlo.

Volvamos a la supernova de Hartwig. Si en la galaxia de Andrómeda se enciende una supernova, debemos suponer que lo mismo puede suceder en nuestra propia galaxia. ¿Hubo también supernovas en nuestra Vía Láctea? ¿Hubo en tiempos históricos un fenómeno de este tipo? Es difícil separar el fenómeno de las supernovas del fenómeno de las novas, relativamente inocuo y normal y del cual hablaremos más tarde; porque si una nova se enciende muy cerca de nosotros, puede aparecer en el cielo con mucho mayor brillo que una supernova situada a mayor distancia. Hoy en día

sabemos que en tiempos modernos han estallado por lo menos dos supernovas en nuestra Vía Láctea. En 1572 el famoso Tycho de Brahe observó una brillante estrella en la constelación de Casiopea, y Johannes Kepler describió en 1604 una estrella muy brillante aparecida en la constelación de Ofiuco, que desapareció al cabo de poco tiempo*. Ambas estrellas eran supernovas, comparables con la que Hartwig descubrió en la nebulosa de Andrómeda. Sabemos actualmente que una supernova es una estrella que se enciende explosivamente y proyecta al espacio grandes cantidades de materia. Hay en nuestra Vía Láctea muchos lugares donde se separan masas de gas a gran velocidad unas de otras, y suponemos que hace mucho tiempo estalló allí una supernova y que ahora estamos observando los restos de la nube explosiva. El ejemplo más famoso está situado en la constelación de Tauro.

LA NEBULOSA CANGREJO Y LA SUPERNOVA CHINO-JAPONESA

En la constelación de Tauro hay una pequeña nebulosa que, a diferencia de la nebulosa de Andrómeda, está compuesta realmente de materia gaseosa difusa y no de estrellas individuales. Se llama nebulosa Cangrejo (véase fig. 7-6, en las páginas centrales del libro). Las masas gaseosas que la componen se separan unas de otras a gran velocidad, y algunas partes se alejan entre sí a velocidades de varios miles de kilómetros por segundo. Puesto que se sabe el tamaño de la nebulosa y se conoce la velocidad con que se expande, puede calcularse el momento de la explosión. Se llega de este modo al año 1000, aproximadamente, después de Cristo. ¿Pudo observarse en este lugar de la constelación de Tauro algún fenómeno sospechoso en el año 1000? Ciertamente: fuentes chinas y japonesas describen una estrella brillante que empezó a brillar en aquel lugar del cielo en el año 1054, precisamente donde hoy está situada

* Hay que considerar como una injusticia patente que de todos los astrónomos de la edad moderna sólo Tycho de Brahe y Johannes Kepler tuvieran la suerte de ver y de describir una supernova. Ambos eran ya personajes importantes, y las leyes que formuló uno de ellos se estudian todavía en las escuelas. Cada uno de ellos, sin hacer casi nada por su parte, recibió un regalo suplementario; una magnífica supernova, mientras generaciones de astrónomos posteriores han esperado vanamente la aparición de un gran espectáculo cósmico en los cielos, que quizá hubiera inmortalizado sus nombres.

la nebulosa Cangrejo. La estrella era tan brillante que durante dos semanas pudo verse incluso a plena luz del día. Aquel fenómeno era una supernova. Al parecer no se ha conservado ninguna observación de este fenómeno en el ámbito europeo. Cuando tengo en las manos un libro de historia siempre busco lo que sucedió en el año 1054. De este modo he llegado a saber muchas cosas sobre aquel año; por ejemplo, fallecimientos de personas que me eran totalmente desconocidas. Pero no hay en estos libros ninguna referencia a un fenómeno celestial que debió de conmover a la gente. Es difícil de entender que un acontecimiento tan impresionante no quedara anotado en ninguna crónica. Quizás en aquella época no teníamos ningún interés por los fenómenos del cielo, o quizá sufrimos catorce días seguidos de mal tiempo.

Al parecer, una supernova es la explosión de una estrella entera y la expulsión de su materia o por lo menos de una gran parte de ella al espacio. ¿Significa esto que desaparece para siempre una estrella, o queda todavía algo de ella? La respuesta llegó en el año 1968. El siguiente capítulo se ocupará del tema. Pero antes sigamos un poco la materia proyectada por las estrellas hacia el espacio.

EL DESTINO DE LA MATERIA EXPULSADA POR LAS ESTRELLAS

El espacio de nuestra galaxia no está vacío, y entre las estrellas hay masas de gas y de polvo. Como veremos en el capítulo 12, estas masas forman nuevas estrellas. El gas pudo estar presente en parte desde un principio; más tarde, el medio interestelar, cuando hubo formado estrellas que devolvieron luego materia al espacio, se mezcló a su vez con los gases expulsados por estas estrellas. En los vientos estelares de estrellas evolucionadas se forman por condensación granos de polvo. De la estrella R Coronae Borealis se escapan auténticas nubes de hollín que oscurecen su luz. En el espacio exterior los átomos de gas se acumulan sobre los granos de polvo formando un manto sólido. Los granos de polvo siguen creciendo hasta que se destruyen de nuevo, en parte porque se vaporizan en las proximidades de una estrella caliente, en parte porque chocan con ellos partículas de alta energía de la radiación cósmica o porque chocan ellas mismas con otros granos. La aportación de materia procedente de las estrellas altera la composición química de la materia interestelar, enriqueciéndose en elementos pesados formados

en las estrellas. Por tanto, las estrellas determinan fundamentalmente la composición de la materia interestelar, es decir, de la materia que sirve para formar nuevas estrellas.

Este enriquecimiento es muy pronunciado cuando explota una supernova, porque, como veremos en el capítulo 11, la supernova proyecta al espacio materia muy evolucionada. Las velocidades en una explosión de supernova son muy altas, y escapan de ella partículas de velocidad muy alta que pronto llenan todo el espacio de nuestra galaxia. Son las partículas de la omnipresente radiación cósmica, que podemos medir incluso en la superficie de la Tierra.

Sólo en 1968 se descubrió que después de explotar una supernova queda en su centro un cuerpo residual, además de la nube de gas brillante que se extiende por el espacio y de la correspondiente radiación cósmica.

VIII. LOS PULSARES NO PULSAN

La información publicada en febrero de 1968, en la revista inglesa "Nature", era tan extraordinaria que la reprodujo la prensa diaria de todo el mundo. Un grupo de Cambridge, bajo la dirección de Antony Hewish, dio a conocer que se habían recibido señales de radio de procedencia cósmica.

PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN NUEVO RADIOTELESCOPIO EN CAMBRIDGE

La radioastronomía había progresado enormemente después de la última guerra. El gas cósmico, especialmente la materia situada entre las estrellas, emite y absorbe radiación en el dominio de las ondas de radio. Estas ondas pueden atravesar como la luz la atmósfera terrestre y ofrecen una posibilidad más de recibir información sobre el Universo desde la superficie de la Tierra. Las ondas cósmicas de radio nos informan sobre el estado de la materia situada entre las estrellas de nuestro sistema estelar. También podemos recibir las ondas de radio emitidas por las masas gaseosas de otras galaxias y estudiarlas. Algunos sistemas estelares emiten con tanta intensidad que se denominan *radiogalaxias*.

Las ondas de radio son perturbadas por la materia procedente del Sol que fluye hacia fuera entre los planetas: es decir, por el viento solar que estudiamos en el capítulo anterior. Este viento imprime sobre la radiación una fluctuación temporal, del mismo modo que las masas gaseosas de la atmósfera terrestre provocan un parpadeo en la luz que nos llega de las estrellas.

En los años sesenta se inició en Cambridge la construcción de un nuevo radiotelescopio para investigar las fluctuaciones provocadas por la materia interplanetaria. Se instalaron más de 2.000 antenas individuales sobre una superficie de dos hectáreas, equivalente a la de 57 pistas de tenis. Este campo de antenas estaba destinado a investigar las fluctuaciones de las radiofuentes provocadas por el viento solar; por tanto, los receptores estaban preparados para reconocer oscilaciones temporales rápidas de las correspondientes ondas de radio, oscilaciones que los radiotelescopios anteriores no podían percibir. El nuevo telescopio tenía, pues, una construcción ideal para descubrir los rápidos cambios de las señales de los pulsares, y este descubrimiento dejó en segundo plano el objetivo original de la instalación, a saber: investigar las fluctuaciones provocadas por el viento solar.

Es imposible mover el gran campo de antenas, y para registrar las ondas de radio se explora el cielo por bandas a medida que va pasando, durante el día, ante la zona a la que miran las antenas. En julio de 1967, la instalación estaba a punto para funcionar y se iniciaron las mediciones. La longitud de onda seleccionada era de 3,7 metros y los receptores captaron día y noche la radiación incidente. Cada semana se marcaban en los 210 metros de cintas registradoras siete zonas del cielo. Se buscaban radiofuentes de emisión uniforme, cuyas señales "parpadearan" al ser observadas a través del viento solar. La doctora Jocelyn Bell se encargó de dirigir el telescopio y de llevar a cabo la laboriosa valoración de las cintas registradoras. Bell buscó fluctuaciones rápidas de los objetos celestes que el movimiento diario de la tierra iba situando ante el radiotelescopio.

EL INFORME DE JOCELYN BELL

Nueve años después, la doctora Jocelyn Bell-Burnell recordaba en una conversación de sobremesa su trabajo doctoral con Hewish en Cambridge. Habló de las interminables cintas registradoras que salían de la impresora y que ella debía medir. Pasados los primeros treinta metros pudo reconocer las radiofuentes que parpadeaban en el viento solar, y distinguir estas perturbaciones de las de origen terrestre. «Seis u ocho semanas después del inicio de la investigación me di cuenta de la presencia ocasional de una determinada impureza en la curva de registro. Su apariencia no era exactamente la de una radiofuente parpadeante, pero tampoco se parecía a una

5 segundos

Fig. 8-1. Señales del primer pulsar descubierto sobre la cinta registradora. Los impulsos individuales no tienen la misma forma, pero se suceden a distancias regulares con gran precisión.

interferencia radiofónica de origen humano. Además, recordé que había visto antes la misma impureza en una cinta que había registrado emisiones de la misma región del cielo.» La doctora Bell quiso estudiar el tema, pero se lo impidieron otras tareas. A fines de octubre de 1967 buscó de nuevo el fenómeno e intentó registrarlo con una superior definición temporal, sin poder descubrir nada. A fines de noviembre descubrió de nuevo la perturbación.

«Mientras las cintas avanzaban debajo de las plumas impresoras, pude ver que la señal se componía de una serie de impulsos, y cuando saqué las cintas del aparato de medición se confirmó inmediatamente mi sospecha de que llegaban a intervalos iguales. Los impulsos estaban separados uno de otro un tercio de segundo (véase fig. 8-1). Me puse inmediatamente en contacto con Tony Hewish, que daba en Cambridge un curso de iniciación. Su primera reacción fue que los impulsos debían de ser de origen humano. Era razonable suponer esto en las circunstancias del caso. Pero a mí no me pareció tan imposible que procedieran de alguna estrella. De todos modos, el hecho le interesó lo suficiente para acudir al día siguiente al telescopio y estar presente cuando la fuente pasara en la dirección de captación del telescopio; y afortunadamente los impulsos llegaron.» Era evidente que la fuente no era de origen terrestre, porque las señales se repetían cuando pasaba delante del telescopio el mismo punto del cielo. Sin embargo, los impulsos parecían de origen estrictamente humano. ¿Eran quizá señales de otra civilización? En todo caso no parecía que llegaran de un planeta en órbita alrededor de otra estrella*. «Poco antes de Navidades decidí hablar con

* En tal caso la separación entre dos impulsos aumentaría y disminuiría siguiendo el ritmo del período orbital del planeta, pues variaría la distancia a la radiofuente y cambiaría el tiempo que la luz necesitaría para cubrir esta distancia. El efecto, referido a otro caso, está representado en la figura 10-5.

Tony Hewish y en una conferencia de alto nivel planteé la cuestión de cómo dar a conocer los resultados obtenidos. Nosotros no creíamos que aquello fueran señales de otra civilización, pero la idea estaba en el aire, y no teníamos pruebas de que se tratara realmente de ondas de radio creadas por la naturaleza. Cuando uno cree que ha descubierto vida en algún lugar del Universo se enfrenta con un problema interesante: ¿Cómo dar a conocer de modo responsable este resultado? ¿Con quién debe hablar primero? Aquellas Navidades no resolvimos el problema, y yo me fui a casa muy preocupada. Tenía que escribir mi tesis y en algún lugar del espacio había unos enanitos verdes que habían visitado precisamente mis antenas y mi frecuencia de observación para comunicarse conmigo. Después de tomar fuerzas con la cena, volví al laboratorio para analizar de noche algunas cintas registradoras. Poco antes de que cerrasen el laboratorio busqué señales en una región completamente distinta del cielo, y en una región interferida por la intensa radiofuente Casiopea A observé de nuevo las impurezas. Tuve que irme del laboratorio, porque era hora de cerrar, pero sabía que aquel punto pasaría a primeras horas de la mañana ante el telescopio. Unas horas después volví al observatorio. Hacía mucho frío, y algún elemento del receptor de nuestro telescopio había padecido sus efectos. ¡Siempre pasa lo mismo! Me puse a apretar botones, a maldecir, a echar el aliento al aparato, y éste funcionó bien durante cinco minutos. Fueron cinco minutos justos: la impureza apareció de nuevo como una serie de impulsos separados ahora por 1,2 segundos. Dejé las cintas sobre la mesa de Tony y me fui a pasar las vacaciones navideñas. ¡Qué suerte tan extraordinaria! Era muy improbable que dos tipos de enanitos verdes utilizaran la misma improbable frecuencia, y que decidieran enviar señales al mismo planeta, la Tierra, al mismo tiempo.»

Poco después, Jocelyn Bell descubrió dos *pulsares* más. A fines de enero de 1968 se envió el manuscrito a la revista "Nature" informando sobre el primer pulsar. Jocelyn Bell-Burnell recuerda los hechos: «Unos días antes de la publicación del trabajo, Tony Hewish celebró un seminario en Cambridge para anunciar los resultados. Acudieron al seminario todos los astrónomos de Cambridge y su interés y su excitación me hicieron comprender por primera vez que estábamos desencadenando una revolución. Estuvo presente el profesor Hoyle y recuerdo su comentario final. Empezó diciendo que había oído hablar por primera vez de aquellas estrellas, y que, por tanto, no había pensado mucho sobre el tema, pero creía que debían ser restos de supernovas y no enanas blancas.»

LÁMINAS

FIGURAS

Fig. 0-1. La galaxia de Andrómeda está situada a unos dos millones de años luz de nuestra galaxia Vía Láctea, a la que pertenecen todas las estrellas solas que pueden reconocerse en la fotografía. La nebulosa de Andrómeda aparece como una mancha nebulosa y elíptica. Sólo los mayores telescopios pueden resolver esta "nebulosa" en innumerables estrellas. Muchas galaxias presentan la estructura espiral visible en esta imagen. Si observáramos la Vía Láctea desde el sistema de Andrómeda ofrecería aproximadamente el mismo aspecto. (Copyright Calif. Inst. of Technology and Carnegie Institution of Washington; reproducida con autorización de Hale Observatories.)

Fig. 0-4. Nebulosa espiral M51 en la constelación de los Perros de Caza. Vemos aquí un sistema galáctico en dirección perpendicular a su plano. Las espirales luminosas son los lugares donde estrellas brillantes y azules excitan y hacen brillar el gas interestelar. La luz que recibimos de esta galaxia ha tardado en llegar unos 12 millones de años. (Fotografía: US Naval Observatory, Washington, EE.UU.)



Fig. 2-5. Grupo estelar de las Pléyades. Las estrellas más brillantes excitan las masas vecinas de gas y las hacen brillar. Las nebulosas brillantes cubren en la fotografía la luz de las estrellas que tienen en su interior. (Los cuatro rayos y el círculo que acompañan en la fotografía a las estrellas brillantes se deben a imperfecciones del sistema fotográfico y no tienen nada que ver con la estrellas.) Además de las estrellas brillantes visibles a simple vista, pertenecen a este grupo más de 100 miembros. Todas se desplazan por el espacio con velocidades iguales. Probablemente todas nacieron al mismo tiempo. (Copyright Calif. Inst. of Technology and Carnegie Institution of Washington; reproducida con permiso de Hale Observatories.)

Fig. 7-5. Nebulosa planetaria NGC 7293. La materia roja brillante fue proyectada por la estrella débil situada en la mitad del anillo. La estrella central se parece a una enana blanca. Las otras estrellas están situadas en el espacio delante o detrás de la nebulosa anular, y no tienen ninguna relación con ella. (Copyright Calif. Inst. of Technology and Carnegie Institution of Washington; reproducida con permiso de Hale Observatories.)



Fig. 7-6. La nebulosa Cangrejo es el resto de una supernova observada en el año 1054. Pero debido al largo camino que tuvo que recorrer su luz, la explosión real tuvo lugar antes de que los sumerios colonizaran Mesopotamia (hacia el 4000 a. de C). (Copyright Calif. Inst. of Technology and Carnegie Institution of Washington; reproducida con permiso de Hale Observatories.)

Fig. 12-1. La brillante nebulosa gaseosa de Orión. El gas interestelar está muy condensado en un volumen de unos 15 años luz de diámetro; hay allí hasta 10.000 átomos de hidrógeno por centímetro cúbico. Esta densidad es muy alta para la materia interestelar; a pesar de ello, el enrarecimiento del gas de la nebulosa de Orión supera el vacío más intenso que puede conseguirse en la Tierra. Se calcula que la masa total del gas brillante es de 700 masas solares. Estrellas azules muy luminosas excitan el gas de la nebulosa y lo hacen brillar. En la nebulosa de Orión hay estrellas que nacieron con toda seguridad hace sólo un millón de años. Se observan en ella condensaciones que permiten deducir la existencia actual de procesos de creación de estrellas. La luz de la nebulosa de Orión que nos llega hoy fue emitida en la época de las invasiones bárbaras. (Fotografía: US Naval Observatory, Washington, EE.UU.)

En el artículo de "Nature" se citaba el hecho de que hasta una cierta fase de la investigación los astrónomos de Cambridge habían contado con la posibilidad de que aquellas señales procedieran de otra civilización, y la prensa se apoderó rápidamente de la noticia. «Cuando descubrieron que había participado una mujer en la historia, la prensa apareció con mayor rapidez todavía. Me fotografiaron de pie ante un río, sentada a la orilla del río, de pie en la orilla estudiando una cinta registradora falsa y sentada en la orilla mirando una cinta registradora falsa. Uno de ellos quería que echara a correr con las manos en alto gritando: ¡Venid amigos, acabo de descubrir algo! (¡Arquímedes no sabe de qué se libró!) Mientras tanto, los periodistas me hacían preguntas de peso, por ejemplo, si yo era más joven o mayor que la princesa Margarita.»

LOS PULSARES SON PEQUEÑOS

La característica de los pulsares que más sorprendió a los astrónomos fue la rapidez con que variaba la radiación. Las estrellas variables de período más breve cambian su luz en un intervalo de una hora o algo menos. Una enana blanca del sistema doble de la nova de 1934 en Hércules —volveremos a hablar de este sistema en el capítulo 9— varía de brillo con un ritmo periódico de 70 segundos. El récord de velocidad se situaba en este dominio, y de pronto los pulsares lo superaban incomprensiblemente. En investigaciones llevadas a cabo en los meses siguientes se descubrió que al estudiar los impulsos con una mayor resolución temporal aparecía con claridad creciente una estructura fina, dentro de la cual la emisión de radio variaba en diezmilésimas de segundo (véase fig. 8-2).

La rapidez con que cambia la radiación dentro de un impulso ofrece ya algunas indicaciones sobre el tamaño de la región del espacio que envía el impulso. Imaginemos para simplificar una esfera tan alejada de un observador que si la observa con un telescopio óptico o a simple vista sólo ve un punto (véase fig. 8-3). La esfera emite un destello luminoso durante un intervalo muy breve. ¿Qué observa el espectador alejado? La radiación se desplaza a la velocidad de la luz. Las distancias desde el receptor a diferentes puntos de la esfera son distintos; por tanto, la radiación emitida al mismo tiempo llega al ojo en tiempos distintos. Primero sólo capta la señal enviada por el punto más próximo a él, luego capta la radiación procedente de una zona anular y finalmente capta la luz que ha

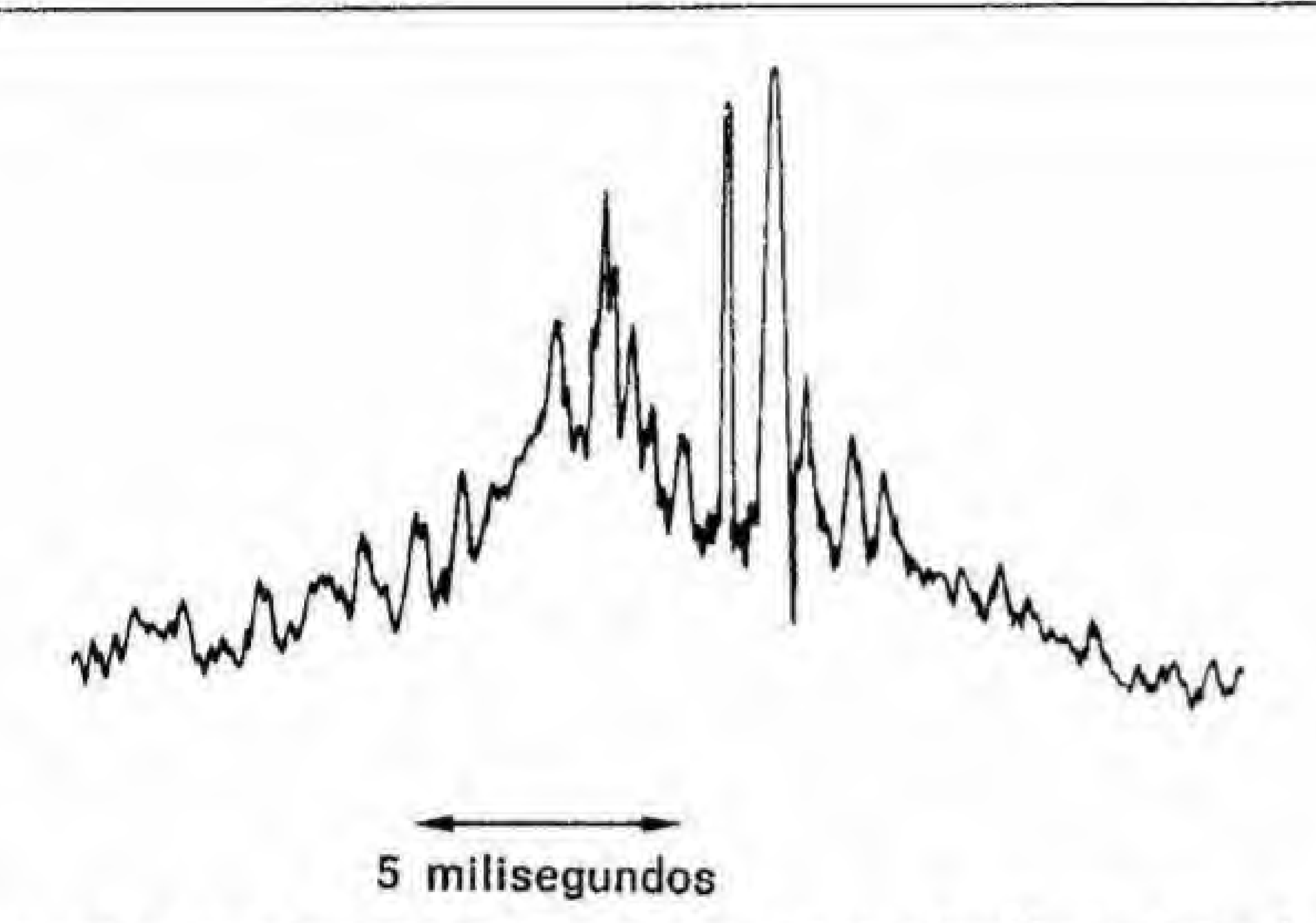


Fig. 8-2. Impulso aislado registrado con mayor resolución temporal. Las señales del pulsar presentan una estructura fina complicada.

tardado más en llegar, es decir, la procedente del borde del disco dirigido hacia él. El ojo del observador captará aquel breve impulso de luz como un impulso difuminado, un impulso de duración mayor. Ahora la longitud del impulso es igual al tiempo que necesita la luz para recorrer el radio de la esfera. Esto no sólo es válido para impulsos, sino que cualquier variación del brillo de la esfera se difumina a lo largo del tiempo, puesto que todas las señales, tanto si anuncian un aumento del brillo como una disminución, deben cubrir recorridos distintos. La difuminación se produce también cuando el dominio que envía la radiación no es una esfera.

Así pues, cuando una fuente de radiación presenta, por ejemplo, variaciones de intensidad de una diezmilésima de segundo, podemos deducir que la fuente no puede ser mucho mayor que el camino recorrido por la luz en este tiempo: es decir, 30 kilómetros. Si la fuente fuera mayor, la variación se difuminaría en un intervalo mayor de tiempo. Dentro de un solo impulso la intensidad fluctúa en unas diezmilésimas de segundo. Los flancos abruptos de los dientes en la curva de la figura 8-2 así lo demuestran. Las ondas de radio se propagan a la velocidad de la luz; por tanto, el objetivo que envía el impulso no puede ser mayor de unos centenares de kilómetros. Este tamaño es pequeño en relación a lo que estamos acostumbrados a ver en el espacio. Las enanas blancas tienen diámetros de varias decenas de miles de kilómetros. Las señales de los pulsares nos

informan, pues, sobre pequeñas regiones espaciales del Universo que emiten ondas de radio muy intensas.

Pronto llegaron de otros lugares de la Tierra noticias sobre el descubrimiento de nuevos pulsares. Actualmente se conocen más de trescientos. Sus períodos van de varias centésimas de segundo hasta 4,3 segundos. Los impulsos individuales no se repiten exactamente con la misma forma, pero la longitud del período se mantiene de modo muy preciso. Si algunos impulsos no llegan a captarse, los siguientes aparecen con el ritmo de antes.

Los impulsos individuales han podido resolverse con mayor precisión todavía y se han descubierto que presentan una estructura más fina que la de la figura 8-2. El récord de rapidez en la variación de la intensidad está situado actualmente en 0,8 millonésimas de segundo. Esto significa que la radiación procede de una región cuyo diámetro es como máximo de 250 metros.

En el mismo año de su descubrimiento se observó que el período de varios pulsares aumentaba. Los pulsares se vuelven más lentos a medida que pasa el tiempo. Sin embargo, el tiempo que trans-

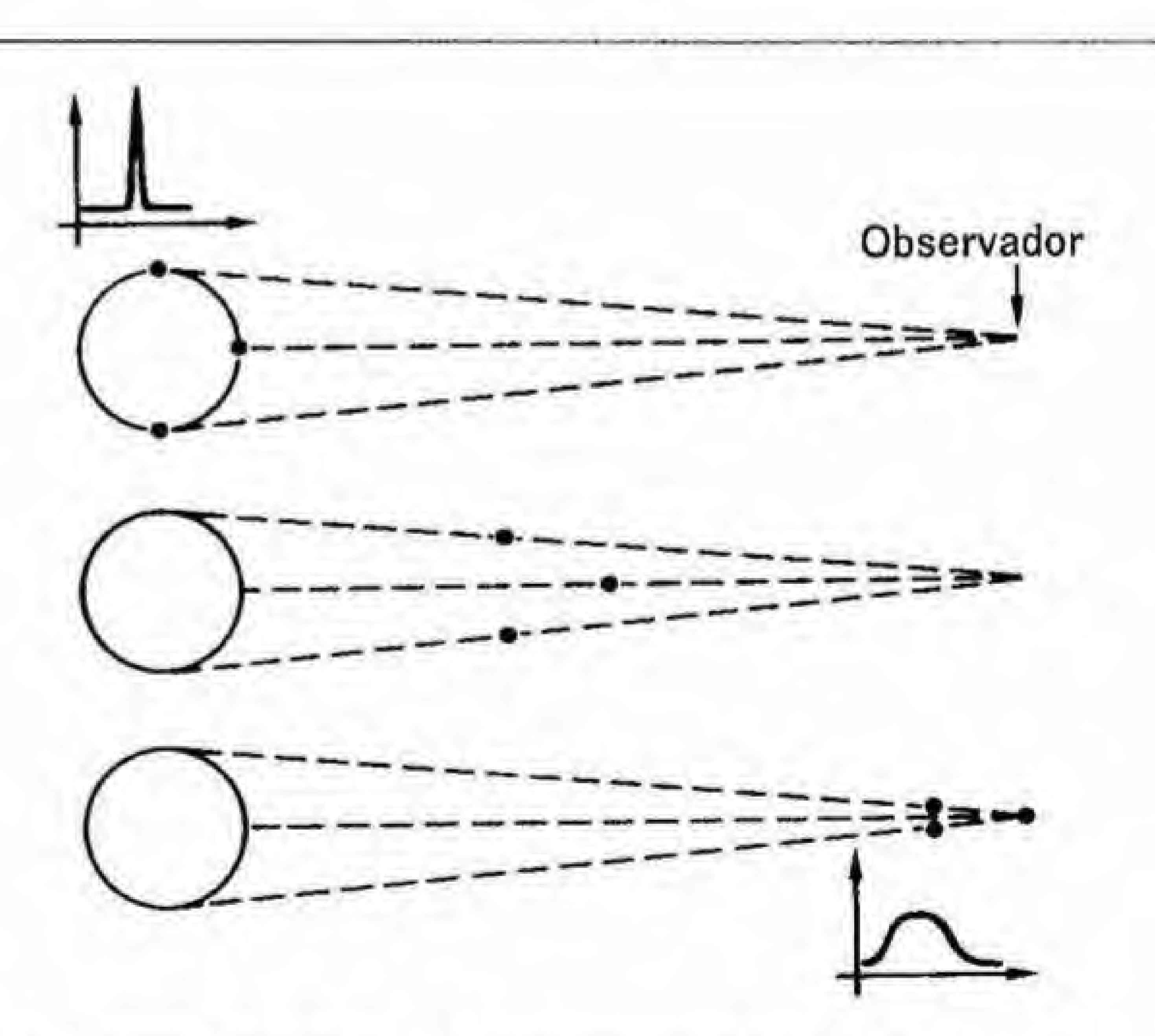


Fig. 8-3. El impulso de luz (arriba a la izquierda) emitido por una superficie esférica se alarga y difumina en el tiempo para un observador lejano (derecha, arriba y abajo), porque las señales luminosas procedentes de puntos distintos de la esfera tardan tiempos distintos en llegar a él.

curre de un período a otro crece muy poco. En promedio se necesitan 10 millones de años para que el período de un pulsar se multiplique por dos.

¿PUEDEN VERSE LOS PULSARES?

¿De qué clase de objeto se trata? ¿Están situados cerca del sistema solar, o están tan alejados como las galaxias? Es fácil deducir que se encuentran entre las estrellas de nuestra Vía Láctea. Sabemos ya que el cinturón de la Vía Láctea que cruza nuestro cielo se debe a la multitud de estrellas que pueblan el disco de nuestra Galaxia. Además, dentro del cinturón galáctico vemos un número especialmente elevado de estrellas en la dirección que corresponde al centro del disco galáctico. Si representamos todos los pulsares sobre un mapa del cielo, la mayoría de ellos se distribuyen como las estrellas de nuestra Galaxia en el cinturón de la Vía Láctea (véase figura 8-4).

O sea, que los pulsares tienen la misma distribución en el espacio que las estrellas: están situados entre ellas. Esto significa que los impulsos de algunos de ellos fueron captados por los telescopios de los radioastrónomos después de estar en camino durante milenios. Los pulsares han de ser fuentes de emisión de enorme potencia, ya que los captamos a pesar de estar a distancias tan grandes. Y, sin

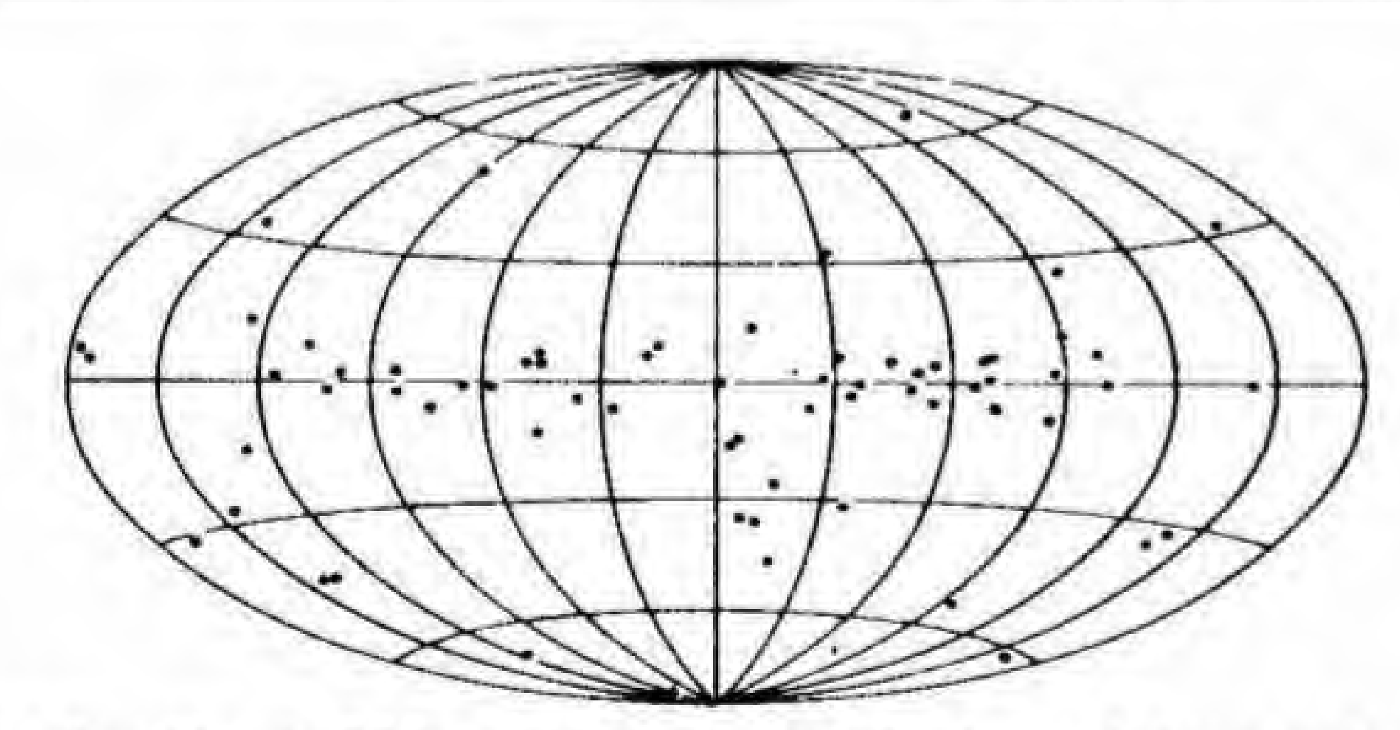


Fig. 8-4. Distribución de 300 pulsares en el cielo. La red de coordenadas angulares está elegida de modo que toda la esfera celeste quede representada en la superficie oval de la red. La Vía Láctea se extiende a lo largo de la línea media horizontal. El centro del disco de la Vía Láctea está situado en el medio. La mayoría de los pulsares están situados cerca de la Vía Láctea.

embargo, la energía procede de un espacio muy pequeño, quizá de sólo 250 metros de diámetro. Después del descubrimiento del primer pulsar y de haber fijado su posición en la esfera celeste con una cierta precisión, se exploró inmediatamente el lugar con telescopios ópticos. Una estrella situada dentro del intervalo angular calculado por los radioastrónomos resultó ser completamente normal. Era evidente, pues, que no tenía ninguna relación con las ondas de radio procedentes de aquella misma dirección. El pulsar se mantenía invisible.

A mediados de otoño de 1968 se descubrieron señales evidentes de pulsar con un período de sólo tres centésimas de segundo en la dirección de la nebulosa Cangrejo. Es decir, que de la nube explosiva de la supernova chino-japonesa de 1054 nos llega radiación de pulsar. ¿Está relacionado con el pulsar alguno de los objetos de tipo estelar presentes en la nebulosa Cangrejo? (Véanse fig. 7-6, en las páginas centrales del libro, y fig. 8-5.) ¿Es alguno de ellos el pulsar?

¿Cómo hay que observar las estrellas para comprobar que una de ellas envía impulsos de radiofrecuencia? ¿Es también pulsante la luz que nos llega de ella en el dominio óptico? El ojo no podría nunca repetir si la radiación de un objeto tan débil es continua o se emite por impulsos. Las placas fotográficas sirven todavía menos para esta tarea, puesto que recogen la luz de una estrella sobre un punto con independencia de que llegue uniformemente o por impulsos.

Se precisa, pues, de una técnica especial para determinar que la radiación visible de una estrella es pulsante. En principio, podríamos situar detrás del telescopio una cámara de televisión y enviar la luz óptica a dos pantallas distintas (véase fig. 8-6). Sabemos ya el período de pulsación de los impulsos de radio; por tanto, podemos enviar durante medio período la imagen televisiva a la pantalla A y durante el medio período siguiente a la pantalla B. Si la radiación visible de un objeto fluctúa siguiendo el ritmo de los impulsos de radio, el impulso óptico pasará siempre a una pantalla, por ejemplo, A, mientras que el tiempo sin impulso, durante el cual no llega radiación visible del objeto, dejará vacía la pantalla B. Las fuentes luminosas que no están pulsadas siguiendo el ritmo del cambio de imagen aparecerán con igual brillo en ambas pantallas. Basta, pues, comparar las imágenes de ambas pantallas de televisión para saber si una de las estrellas emite su luz siguiendo el ritmo periódico de los impulsos de radio.

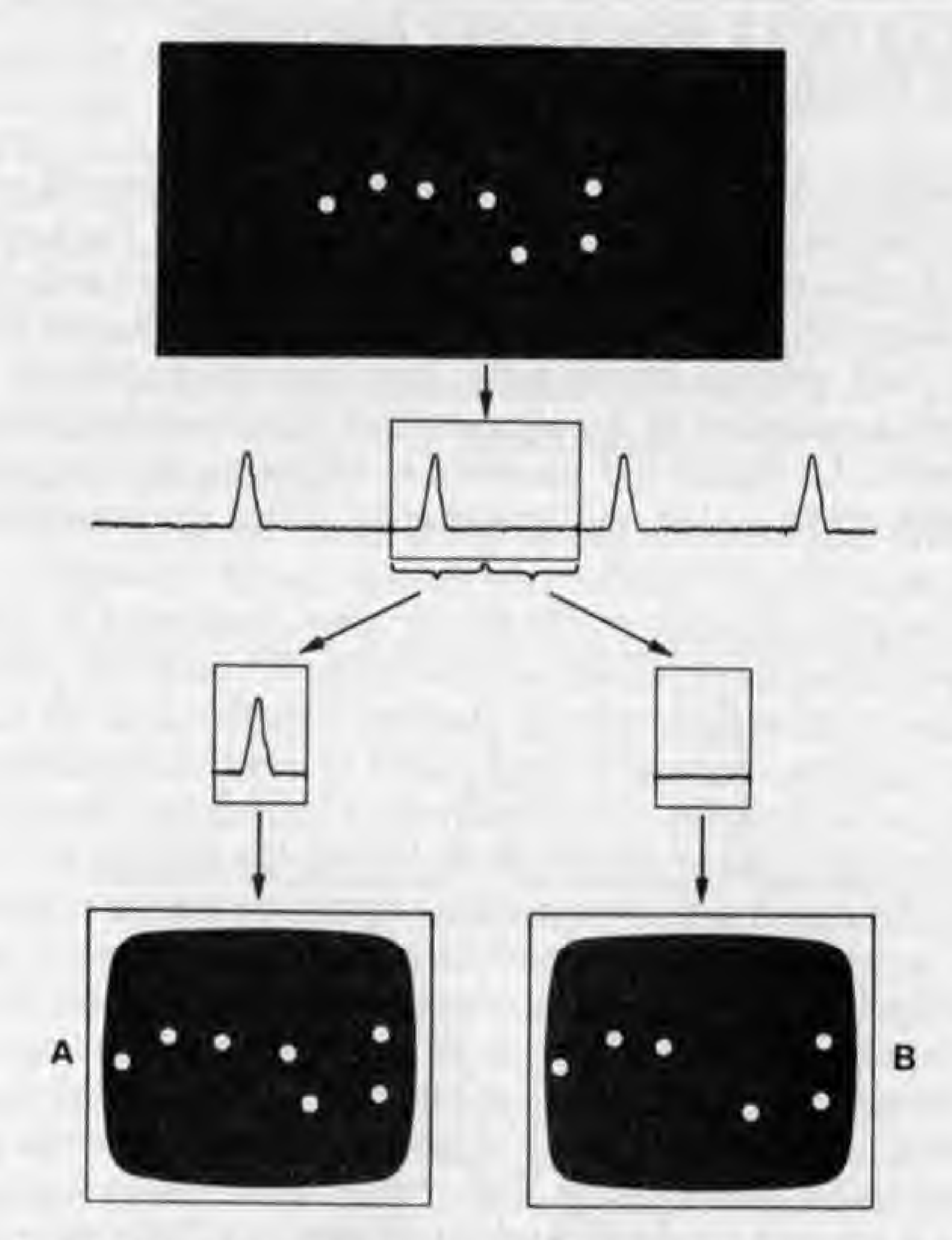


Fig. 8-6. Principio que permite reconocer si una estrella emite su luz de modo uniforme o por impulsos. Arriba vemos el grupo estelar sin cambios especiales. Debajo están los destellos periódicos de luz de una de las estrellas. La imagen captada por una cámara de televisión se transmite siguiendo el ritmo del período estelar a dos pantallas de televisión A y B. La pantalla A recibe siempre la imagen con impulso, la pantalla B recibe la imagen cuando la estrella no emite impulso. Comparando las dos imágenes (debajo) puede reconocerse la estrella que emite su luz con pulsaciones. (El método aparece aplicado aquí a una estrella de la Osa Mayor. Esta estrella no es en realidad un pulsar, es una estrella totalmente inofensiva que nos envía su luz de modo uniforme.)

◀ **Fig. 8-5.** Región central de la nebulosa Cangrejo. Compárese esta fotografía con la fotografía en color de la figura 7-6. Puede reconocerse en el centro de aquella fotografía el campo aplicado aquí. (Fotografía en el foco primario del reflector Shane del Observatorio Lick, tomada por J. D. Scargle.)

EL PULSAR DE LA NEBULOSA CANGREJO SE HACE VISIBLE

El método descrito permitió finalmente descubrir el pulsar. El aparato utilizado se basaba en el mismo principio, pero en vez de tomar una vista panorámica se investigó individualmente cada estrella de la región. No se repartió entre varias pantallas de televisión la luz de cada estrella investigada, sino que se transmitió a varios contadores de cuantos de luz siguiendo el ritmo periódico del pulsar del Cangrejo. La figura 8-7 muestra el esquema de esta medición. Si la estrella emite su luz uniformemente, todos los contadores reciben un número igual de cuantos de luz. Si una estrella emite destellos siguiendo el ritmo del pulsar del Cangrejo, en cada intervalo periódico sólo trabajan los contadores que cuentan precisamente cuando llega el impulso, mientras que los demás contadores permanecen inactivos. Es decir, que si se distribuye del modo descrito la luz del pulsar durante muchos períodos a los distintos contadores, los contadores que van recibiendo luz del impulso cuentan cada vez números mayores, mientras que los demás reciben como máximo luz del cielo nocturno que no es nunca oscuro del todo, y los números que cuentan son pequeños. Se dice que en el sistema de contaje se "acumula" un impulso.

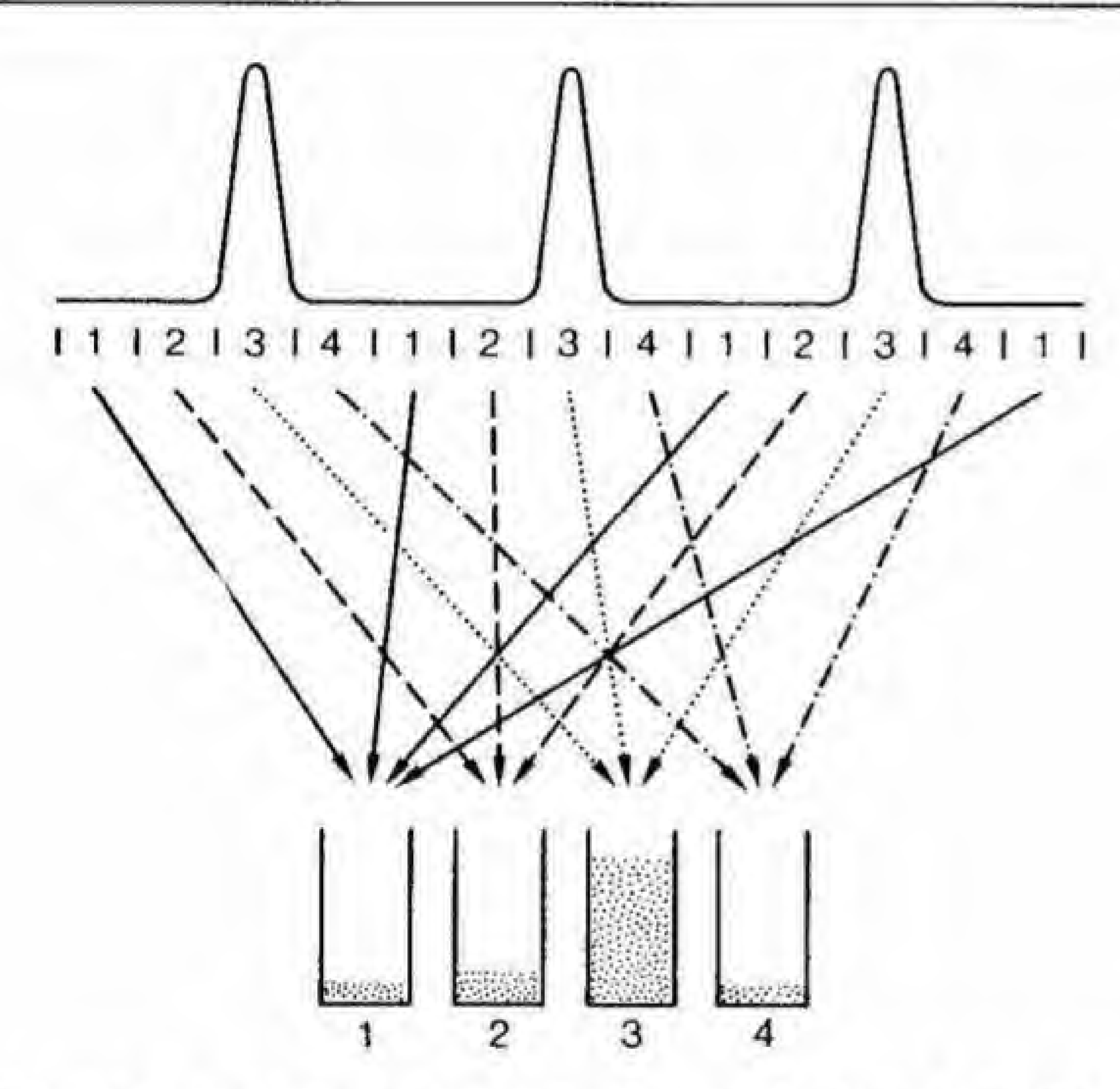


Fig. 8-7. Sistema semejante que permite descubrir si una estrella emite su luz en forma de impulsos. La luz se distribuye a una serie de contadores siguiendo el ritmo periódico (conocido gracias a los impulsos de radio), y los contadores suman los cuantos de luz. Los cuatro contadores están representados en la parte inferior de la figura por cuatro cajas, donde van "cayendo" los cuantos de luz (puntos). Cada intervalo periódico está subdividido en cuatro intervalos. El aparato de medición "echa" los cuantos de luz que recibe durante el primer intervalo temporal en la caja 1, durante el segundo en la 2, etc. Cuando termina el período el aparato pasa de nuevo a la caja 1. En este caso el contador 3 recoge muchos cuantos de luz; los restantes contadores han quedado casi vacíos.

En noviembre de 1968, dos jóvenes astrónomos, William John Cocke y Michael Disney, decidieron solicitar tres noches de observación en el telescopio reflector de 90 cm del observatorio Steward de Tucson, Arizona. Ninguno de los dos tenía experiencia en la astronomía de observación y ambos querían aprovechar estas noches para familiarizarse con el telescopio. Mientras estaban pensando qué observar, apareció a principios de diciembre en la revista "Science" la noticia del descubrimiento del pulsar del Cangrejo y se decidieron a utilizar el tiempo de observación concedido para estudiar este pulsar en luz visible. El Instituto disponía de un contador adecuado para el caso. Lo había construido Donald Taylor para un trabajo muy distinto, y ya que él contribuía al proyecto con su aparato electrónico, decidieron incluirlo en el equipo. Desde el punto de vista técnico todo era perfecto, pero el plan no parecía muy prometedor, pues nadie había conseguido hasta entonces identificar un pulsar con una estrella visible. Cocke y Disney aprenderían por lo menos a manejar el telescopio, y en todo caso se podría probar de este modo la electrónica de Taylor.

A principios de enero se montaron los aparatos de medida en el Kitt-Peak. Los preparativos finalizaron el 11 de enero y los astrónomos apuntaron por primera vez el telescopio hacia la nebulosa Cangrejo. Midieron con cada estrella más de 5.000 períodos de pulsar, enviando durante este tiempo las señales luminosas a varios contadores siguiendo el ritmo de los períodos de radio. Ninguna estrella de la zona investigada acumuló un impulso en los contadores. Taylor regresó a Tucson el 12 de enero, y se quedaron en la montaña Cocke y Disney, apoyados por Robert W. McCallister, que estaba al servicio de la electrónica. El 12 de enero, mientras el tiempo empezaba a empeorar, tampoco se registró ningún resultado. Las dos noches de observación siguiente, las últimas concedidas

al proyecto, fallaron por culpa del mal tiempo, y la empresa parecía que iba a fracasar.

A menudo, el azar juega un papel importante. William G. Tifft, el observador encargado del telescopio a partir del 15 de enero, concedió a los principiantes dos noches más, las del 15 y 16 de enero, para que pudieran intentarlo de nuevo. Reproduzco a continuación las propias palabras de Disney.

«El día 15 el cielo amaneció nublado, pero por la noche se despejó. Empezamos puntualmente a las 20 horas. Taylor estaba todavía en Tucson y Cocke y yo nos turnábamos al telescopio, mientras McCallister manejaba el aparato de Taylor. En la primera sesión probamos de entrada el fondo del cielo, sin estrellas. En la segunda sesión enfocamos nuestro aparato en la estrella que Walter Baade había considerado la estrella central de la nebulosa Cangrejo. Bastaron 30 segundos para que los contadores mostraran un impulso claro que creció continuamente. Vimos también un impulso secundario más pequeño, que al parecer llegaba medio período después del impulso principal; era un impulso bastante ancho y no tan alto como el impulso principal. Mientras McCallister continuaba manejando tranquilamente el aparato, Cocke y yo pasábamos por arrebatos de excitación histérica y momentos de profunda depresión. ¿Era el pulsar o estábamos ante un efecto perturbador de la electrónica? En definitiva, la frecuencia del pulsar correspondía a la mitad de la frecuencia de la corriente alterna americana. Al repetir la medición apareció de nuevo el impulso con todo su esplendor, y la moral bajo la cúpula subió de nuevo.

»A las 20.30, media hora después del inicio de la observación, llamé por teléfono a Taylor. Primero se mostró escéptico, luego aconsejó cambios en la electrónica para eliminar posibles fallos. Pero él mismo se convenció en la noche siguiente cuando pudo ver personalmente cómo se acumulaba el pulso.

»A las 22.10 llamamos a nuestras esposas, y tuvimos dificultades para evitar que se presentaran inmediatamente en la montaña. A la 1.22 vino la niebla. La observación había finalizado. Los tres observadores de la cúpula estaban totalmente convencidos de que habían descubierto el primer pulsar óptico.» Aquí finaliza el informe de Disney.

Otros se encargaron luego de confirmar el descubrimiento. En la figura 8-8 vemos dos imágenes confeccionadas de acuerdo con el principio de la figura 8-6. El pulsar que falta en la imagen parcial de la derecha es pues la inferior de las dos estrellas centrales de la

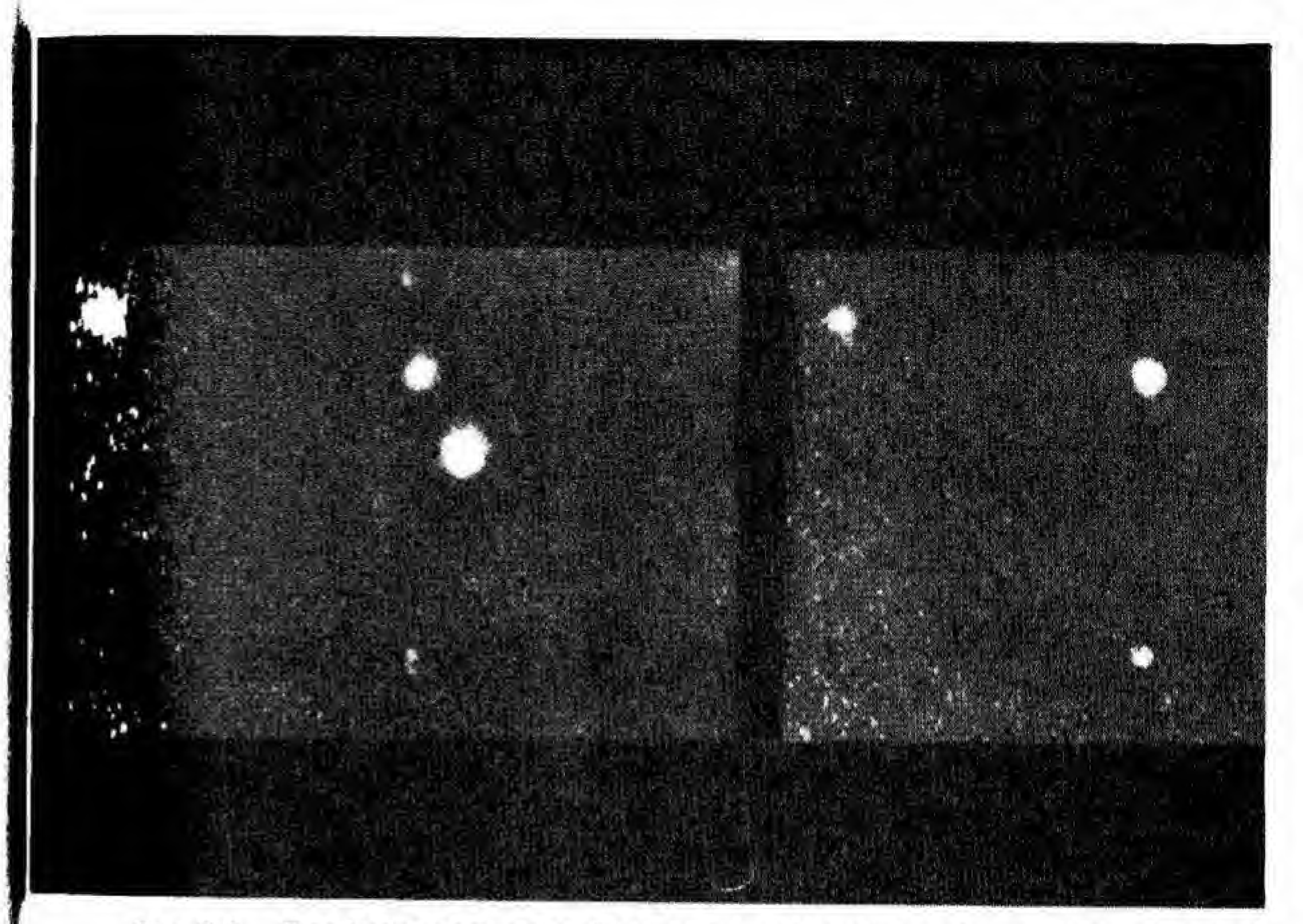


Fig. 8-8. Dos imágenes construidas con el método de las dos pantallas de televisión (véase fig. 8-6) permiten descubrir que una de las estrellas de la figura 8-5 emite su luz siguiendo el ritmo del pulsar del Cangrejo. La estrella está señalada en la figura 8-5 con dos marcas blancas en el borde derecho e inferior. Comparando la figura 8-5 con la figura 7-6 puede encontrarse fácilmente en la fotografía en color el pulsar del Cangrejo, que allí no se distingue en nada de las demás estrellas. (Fotografía: Observatorio Lick.)

figura 8-5. Está marcada con indicadores en el borde derecho e inferior de la imagen. A partir de la figura 8-5 puede pasarse a la fotografía general de la nebulosa Cangrejo de la figura 7-6 y encontrar allí el pulsar.

¿QUÉ SON LOS PULSARES?

Después del descubrimiento del pulsar del Cangrejo quedó claro que los pulsares están relacionados con las explosiones de supernovas. Al parecer, los restos de una estrella que ha explotado como

una supernova emiten señales de pulsar. Esto se confirmó con otro pulsar que emite desde un punto del cielo donde hay unas masas gaseosas que hacen pensar en una anterior explosión de supernova. Al parecer, el hecho tuvo lugar hace mucho tiempo. Esta explosión en la constelación Vela debió acontecer mucho antes que la de la supernova de la nebulosa Cangrejo, porque las masas gaseosas expulsadas ya no forman en el cielo una mancha compacta sino filamentos separados que llenan un gran espacio y que son, pues, filamentos gaseosos. El período de este pulsar es de 0,09 segundos, mayor, por tanto, que el del pulsar del Cangrejo. Es el tercer pulsar más rápido que conocemos. La búsqueda del objeto en el dominio visible empezó inmediatamente, pero no se encontró hasta 1977. La carta que llegó el 9 de febrero a la redacción de la revista "Nature" comunicando la identificación segura con una estrella del pulsar de Vela estaba firmada por doce autores. Si se tiene en cuenta que en los ocho años transcurridos, además de los doce científicos triunfantes que trabajaban en Inglaterra y Australia, muchos astrónomos provistos de los mejores telescopios del mundo habían buscado en vano la estrella cuya luz seguía el ritmo del pulsar de Vela, comprenderemos que la carta puso punto final a una laboriosa campaña mundial de búsqueda. Además, Michael Disney, que había intervenido ya en el descubrimiento del pulsar del Cangrejo, formaba parte nuevamente del equipo.

Hasta ahora no hay rastro en luz visible de ningún pulsar más. Sea lo que fuere un pulsar, su origen se debe a la explosión de una estrella en forma de supernova. Al principio el período es corto, más breve que el del pulsar del Cangrejo, y la estrella no sólo emite impulsos de radio, sino también destellos luminosos. En el curso del tiempo el ritmo de los impulsos se va alargando. En menos de mil años el período se ha alargado hasta alcanzar el del pulsar del Cangrejo, y después el del pulsar de Vela. A medida que se alarga el período de pulsación, la estrella se debilita en luz visible. Cuando su período alcanza una magnitud de segundos o más, los destellos ópticos desaparecieron desde hace tiempo, pero la estrella todavía se hace notar con sus ondas de radio. Esto explica que sólo se hayan podido observar dos pulsares de períodos muy breves. Son pulsares muy jóvenes, y en ellos pueden reconocerse todavía los restos de la nube explosiva. Los pulsares más antiguos perdieron desde hace tiempo su luminosidad en el dominio visible.

Pero, ¿qué son los pulsares? ¿Qué queda de una estrella cuando su vida finaliza con una explosión gigante? Sabemos ya que las

regiones del espacio de donde procede la radiación pulsante han de ser muy pequeñas. ¿Qué procesos pueden tener lugar en un pequeño espacio durante tanto tiempo y repetidos tan regularmente que podamos hacerlos responsables del fenómeno de los pulsares? ¿Son estrellas que se hinchan y se encogen como las cefeidas? Si son estrellas pulsantes han de ser pequeñas, pues sólo así pueden emitir con períodos breves de oscilación. Recordemos que los períodos de las estrellas cefeidas se cuentan por días. Ahora buscamos objetos capaces de oscilar en centésimas de segundo. Ni las estrellas más densas conocidas, las enanas blancas, pueden oscilar con la suficiente rapidez. Hay que preguntarse si pueden existir estrellas de densidad mayor, estrellas que dejen muy detrás a las enanas blancas y a sus densidades de toneladas por centímetro cúbico.

Las primeras ideas sobre el tema se debieron a dos astrónomos de Pasadena, mucho antes de que se sospechara la existencia de pulsares. Trabajaba allí durante los años treinta con el mayor telescopio del mundo existente en aquel entonces Walter Baade, nacido en Alemania. Era uno de los mejores astrónomos observadores del siglo. También formaba parte del equipo de Pasadena el suizo Fritz Zwicky, un hombre de gran fantasía. Ambos astrónomos señalaron que eran perfectamente imaginables estrellas de extraordinaria densidad, cuya materia estuviera compuesta prácticamente de neutrones. Luego, en el año 1939, los físicos Robert J. Oppenheimer y George M. Volkoff publicaron en la revista norteamericana de física "Physical Review" un trabajo sobre las estrellas de neutrones. Pero antes de que los astrofísicos se ocuparan seriamente de estrellas de neutrones, el nombre de uno de los autores se haría famoso en todo el mundo, pues Oppenheimer participó de modo destacado en la fabricación de la bomba atómica norteamericana.

Desde el trabajo de Oppenheimer y Volkoff se sabe que la materia formada exclusivamente de neutrones, producto de la fusión de electrones y protones, puede constituir cuerpos estelares cohesionados por su propia gravedad. Estas *estrellas de neutrones* pueden calcularse teóricamente si se conocen las propiedades de la materia neutrónica. Los "modelos estelares" de las estrellas de neutrones demuestran que poseen una densidad muy elevada. En ellas la masa del Sol comprimida cabría en una esfera de 30 kilómetros de diámetro, y un centímetro cúbico de estas estrellas contendría miles de millones de toneladas de materia neutrónica (véase fig. 8-9). Si una estrella de neutrones entrara en oscilación lo haría con mucha mayor rapidez que un pulsar. Por tanto, si buscamos un reloj regular



Fig. 8-9. El Sol, una enana blanca, la Tierra y una estrella de neutrones comparados a escala. El Sol muestra sólo su borde en la parte superior del dibujo.

que explique el período de los pulsares, tenemos que excluir las posibles oscilaciones de las estrellas de neutrones.

Estamos, pues, de nuevo al principio de todo. Hemos buscado objetos densos de tipo estelar cuya oscilación fuera lo suficiente rápida, y hemos visto que las enanas blancas son demasiado lentas y que las hipotéticas estrellas de neutrones son, por otro lado, demasiado rápidas.

THOMAS GOLD EXPLICA LOS PULSARES

Sus colegas astrónomos le llaman Tommy. Nació en Austria y emigró en el momento justo a Inglaterra. Allí estudió, trabajó con Hermann Bondi, que también había emigrado a Inglaterra, y con Fred Hoyle luego se fue a EE.UU. Cuando la noticia del descubrimiento de los pulsares dio la vuelta al mundo, estaba enseñando en la Universidad de Cornell, en Ithaca, Nueva York. Mientras las revistas técnicas se llenaban de intentos prematuros de explicación, que generalmente pretendían salvar la idea de una pulsación, las ideas de Tommy Gold tomaban otra dirección.

Uno de los procesos periódicos más regulares en el cielo es la rotación de los cuerpos celestes. El Sol gira sobre su eje cada 27 días; hay estrellas que giran mucho más deprisa. Cabe pues la posibilidad de que el período de los pulsares tenga algo que ver con un proceso de rotación. En tal caso, el astro tendría que efectuar una rotación sobre su eje cada segundo, y en el caso del pulsar del Cangrejo debería efectuar treinta rotaciones por segundo. Pero una estrella no puede girar a cualquier velocidad, porque la fuerza centrífuga la despedazaría. Sólo pueden girar rápidamente sobre su eje las estrellas en cuya superficie la gravedad es muy intensa, y una enana blanca podría girar como máximo una vez por segundo. Si girara con el período del pulsar del Cangrejo, la fuerza centrífuga la destruiría. Sólo pueden girar más deprisa las estrellas más densas.

Volvamos ahora por segunda vez a las estrellas de neutrones y planteémonos la posibilidad de que el reloj regular de los pulsares sea la rotación de una estrella de neutrones. La tal estrella de neutrones debería girar sobre su eje en una fracción de segundo. El hecho es muy posible y su gravedad es tan intensa que lo permitiría. Podría incluso girar mucho más deprisa.

Los astrofísicos consideran de momento que la hipótesis de Tommy Gold es la más razonable: los pulsares son estrellas de neutrones en rotación. En tal caso, el progresivo alargamiento del período de los pulsares se explicaría por una disminución de la velocidad de giro de las estrellas de neutrones a lo largo del tiempo. Esto parece lógico, porque la energía que emite el pulsar en las frecuencias de radio y de luz visible podría cubrirse con la energía de rotación de la estrella de neutrones. La radiación emitida bastaría por sí sola para frenar lentamente la estrella, pero el efecto de frenado es todavía más intenso.

Se ha calculado que la energía de rotación liberada por el progresivo frenado del pulsar, de la nebulosa Cangrejo no sólo podría alimentar la radiación del pulsar, sino la emisión de toda la nebulosa. Esto nos permite también resolver otro problema.

La luz de las nebulosas gaseosas normales, como la de la nebulosa planetaria de la figura 7-5 o la de la nebulosa de Orión de la figura 12-1, es emitida por átomos; en cambio, la luz de la nebulosa Cangrejo tiene un origen totalmente distinto. Se encuentran en la nebulosa de electrones que la explosión de la supernova impulsó a gran velocidad y que se desplazan tan deprisa como la luz. El campo magnético de la nebulosa les obliga a recorrer órbitas circulares y los electrones emiten su energía en forma de luz. Se había planteado desde el principio el siguiente problema: ¿por qué estos electrones se mueven a tal velocidad desde 1054? ¿Por qué no van frenándose al emitir energía? Al frenarse emitirían menos energía, y la luminosidad de la nebulosa Cangrejo disminuiría. Es evidente que los electrones reciben energía de alguna otra fuente, y ahora tenemos la fuente de esta energía. Si Tommy Gold está en lo cierto, dentro de la nebulosa Cangrejo hay una estrella de neutrones en rotación que entrega energía al gas vecino quizá mediante su campo magnético. La estrella de neutrones se mueve en la nebulosa como un molinillo, ocupándose de que no disminuya la velocidad de los electrones y de que la nebulosa Cangrejo no pierda su brillo.

En la estrella de neutrones hay energía rotativa para varios miles de años.

Hemos descubierto un mecanismo que puede explicar, por lo menos, el período regular de los pulsares, pero nos falta una explicación del origen concreto de la emisión de radio. No son ondas simples de radio sino impulsos, o sea, que en la mayor parte del período no recibimos energía y en un tiempo muy corto nos llega una gran cantidad de ella. Por tanto, debemos suponer que la estrella emite en una dirección determinada y que el rayo dirigido de esta estrella rotativa pasa por nosotros a intervalos regulares, como pasa sobre una nave el haz móvil de un faro.

Es probable que la estrella de neutrones tenga un campo magnético parecido al de nuestra Tierra, pero mucho más intenso (en el capítulo 10 volveremos a este tema al tratar las estrellas de rayos X). Supongamos que el campo magnético no tenga la dirección del eje de rotación, como tampoco lo tiene en la Tierra. Si la estrella de neutrones gira, su campo magnético gira con ella. La explicación imaginada es más o menos la siguiente (véase fig. 8-10): En la superficie de la estrella de neutrones, magnética y en rotación, donde los neutrones se desintegran formando de nuevo electrones y protones, dominan intensas fuerzas eléctricas, que proyectan al exterior las partículas cargadas de la estrella. Estas partículas vuelan por el espacio siguiendo las líneas del campo magnético. Su energía permite que la nebulosa Cangrejo continúe brillando hoy en día, mil años después de su creación. Las partículas cargadas difícilmente atraviesan las líneas del campo magnético, por tanto abandonan la estrella de neutrones preferentemente por sus polos magnéticos, y recorriendo las líneas curvadas de campo salen hacia el exterior a gran velocidad. La figura 8-10 representa esquemáticamente el proceso. Los electrones, las partículas más ligeras que abandonan la estrella, tienen la velocidad más alta, y probablemente se desplazan a velocidades próximas a las de la luz. Sin embargo, un electrón que recorre a tal velocidad una órbita curvada, emite energía. Esta energía no se reparte uniformemente en todas direcciones, sino que forma un haz estrecho en la dirección de vuelo de los electrones. Esto significa que la radiación abandona la estrella en la dirección a la que miran las líneas de fuerza magnética que salen de la estrella. O sea, que la radiación fluye hacia fuera confinada en dos volúmenes del espacio en forma de cono. El campo magnético sigue la rotación de la estrella, por tanto los dos conos radiantes también giran. Un observador alejado sólo capta radiación cuando sobre él pasa

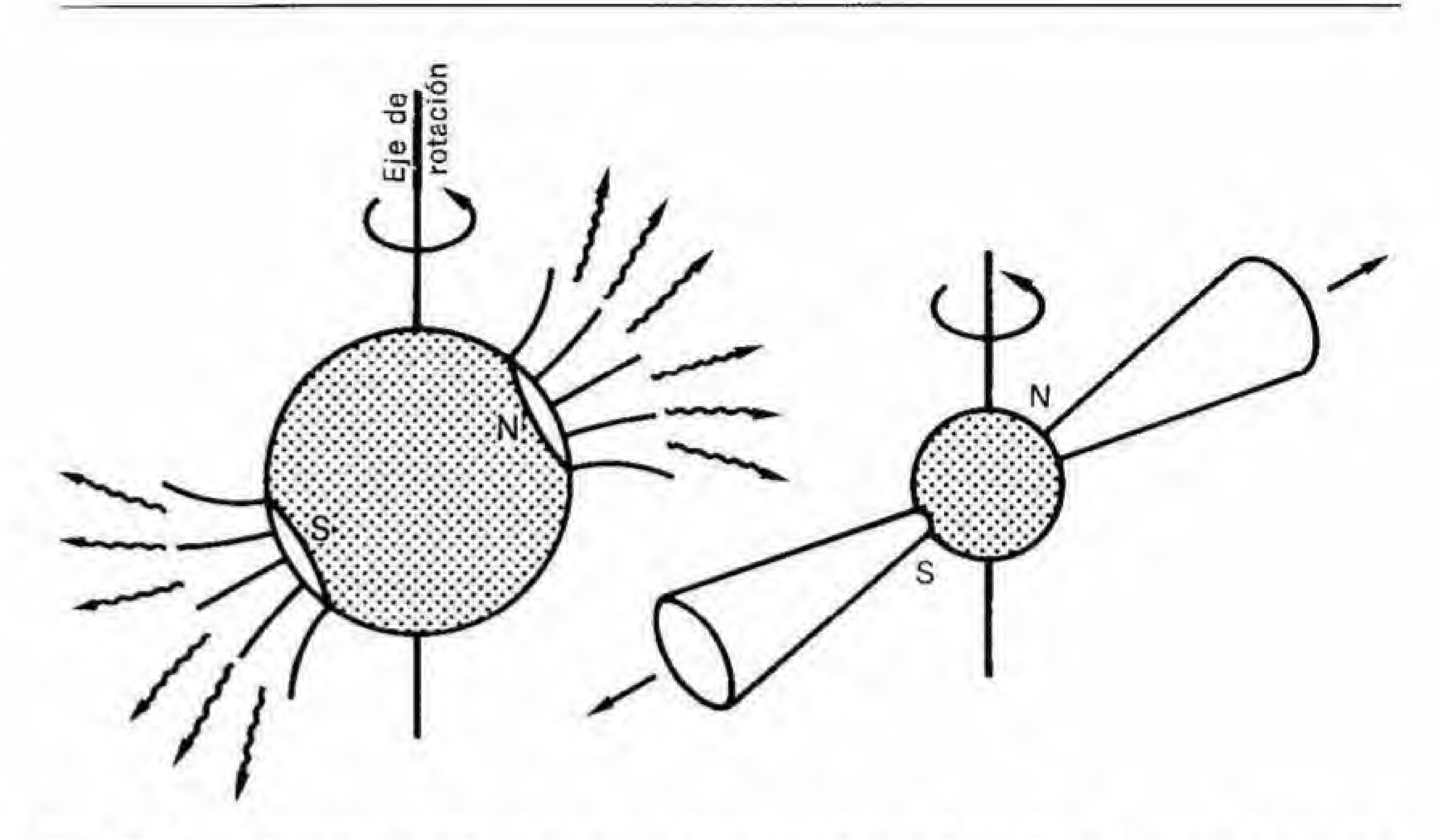


Fig. 8-10. Modelo posible del origen de las señales del pulsar. Por los dos polos magnéticos N y S de una estrella de neutrones en rotación escapan electrones al espacio con una velocidad próxima a la de la luz siguiendo las líneas del campo magnético. La energía que emiten cerca de la estrella forma un haz en su dirección de fuga. Los cuantos de radiación están representados en el dibujo de la izquierda por flechas onduladas. La radiación que escapa de la estrella de neutrones sale de los polos magnéticos hacia el espacio en forma de dos conos radiantes (derecha). La rotación de la estrella de neutrones arrastra consigo estos dos conos, que iluminan el espacio como dos reflectores. Un observador sólo capta radiación cuando uno de los conos le ilumina. La rotación de la estrella de neutrones ilumina al observador siguiendo el ritmo con que ella gira.

uno de los dos conos, y cree que la estrella de neutrones le está iluminando regularmente siguiendo el ritmo de su rotación. Según esta idea, que la mayoría de astrofísicos considera actualmente más o menos correcta, la radiación que sale de la estrella en la dirección del polo del campo magnético nos ilumina como si fuera realmente el haz rotativo de un faro.

En noviembre de 1982 se produjo una conmoción en el mundo astronómico, cuando se supo que cinco radioastrónomos habían descubierto con un radiotelescopio, en Puerto Rico, un nuevo pulsar que superaba el récord de velocidad del pulsar del Cangrejo. El nuevo pulsar nos envía 642 impulsos cada segundo. Esto significa que la correspondiente estrella de neutrones gira sobre su eje más

de 600 veces por segundo. La gravedad en la superficie de una estrella de neutrones es tan grande que la estrella no se fragmenta a pesar de girar tan rápidamente.

CUESTIONES PENDIENTES

En la primavera de 1969 dos observatorios descubrieron, independientemente, que un pulsar interrumpía la lenta y continua variación de su período, y reducía de golpe el tiempo entre dos impulsos consecutivos (véase fig. 8-11). Luego la reducción del período continuó al mismo ritmo que antes. Si nos hemos encariñado con la idea de que el pulsar es una estrella de neutrones en rotación, que el medio que le rodea va frenando, reduciendo así su velocidad, debemos preguntarnos ahora qué causa tiene esta aceleración repentina de la estrella.

El cambio es brusco. Los físicos nucleares, más acostumbrados que los astrofísicos a tratar con neutrones, creen que en la superficie

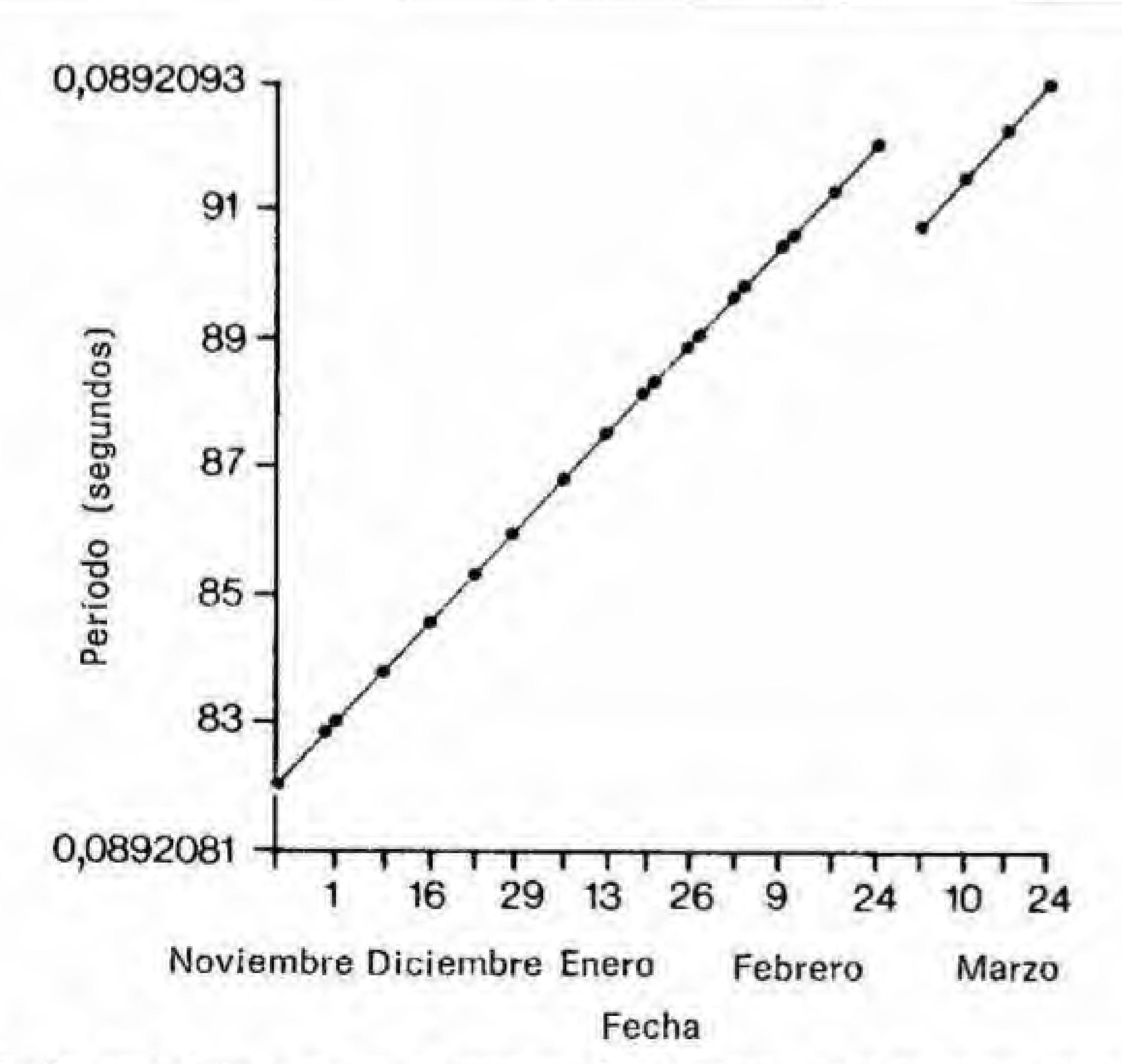


Fig. 8-11. Salto periódico de un pulsar. El período del pulsar, que crece lentamente, se acorta de repente (arriba a la derecha) y luego continúa su crecimiento.

de la estrella de neutrones se forman cortezas sólidas, que se fracturan ocasionalmente al enfriarse esta estrella, producto final de una explosión de supernova. La estrella se encoge algo a causa de esta rotura, y su velocidad de rotación aumenta. ¿Es ésta la explicación del repentino acortamiento del período que se ha registrado luego en todo un conjunto de casos? Grandes cambios en la corteza terrestre pueden alterar el período de rotación de la Tierra y, por tanto, la longitud del día. ¿Nos informan los saltos de los períodos de rotación de los pulsares sobre terremotos acaecidos en las estrellas de neutrones?

En los últimos diez años ha hecho grandes progresos un nuevo campo de la astronomía de observación: la *astronomía de rayos gamma*. Los rayos gamma pueden considerarse una luz de longitud de onda muy corta. Los cuantos individuales de esta radiación tienen longitudes de onda más cortas todavía que los rayos X. La radiación es muy enérgica; la energía que contiene cada uno de sus cuantos es un millón de veces superior a la de un cuanto de luz visible. La radiación gamma, al igual que los rayos X procedentes del espacio, no puede atravesar nuestra atmósfera, y los primeros rayos gamma cósmicos se captaron cuando se pudo observar el espacio mediante cohetes y satélites. Una de las sorpresas que nos ha proporcionado hasta ahora esta rama de la astronomía es que varios pulsares emiten impulsos de rayos gamma. La energía de los rayos gamma es tan grande que parece como si el elemento principal de los pulsares fuera la radiación gamma, y las ondas de radio que nos permitieron descubrir de entrada los pulsares constituyeran un fenómeno secundario de escasa importancia, del mismo modo que el estampido de una explosión constituye un fenómeno secundario despreciable. Los impulsos gamma llegan con el mismo ritmo que los de radio, pero no coinciden con ellos. Hasta ahora no se ha podido explicar el fenómeno de los pulsares en el dominio de los rayos gamma.

Los pulsares plantean en la actualidad otro problema a los astrónomos. Se conocen tantos pulsares, que el número total de pulsares activos actualmente en nuestra galaxia puede calcularse en un millón. Por otra parte, desde hace decenios vigilamos las galaxias lejanas para saber cuántas explosiones de supernova tienen lugar como promedio en ellas por siglo, y evaluar así el número de estrellas de neutrones creadas en los últimos tiempos en nuestra propia Vía Láctea. De momento parece que hay muchos más pulsares presentes en el espacio de lo que deberían permitir las explosiones de

supernovas. ¿Indica esto que los pulsares pueden también nacer de otro modo? ¿Es posible que una parte de ellos no nazcan en una explosión estelar, sino mediante un proceso menos espectacular y en cierto modo más pacífico?

Antony Hewish obtuvo en 1974 el premio Nobel de Física por su descubrimiento de los pulsares. El descubrimiento fue magnífico, pero el nombre es incorrecto, porque los pulsares no pulsan. Cuando se les dio nombre se pensaba todavía que eran estrellas que se expandían y contraían como las estrellas cefeidas. Hoy sabemos que son estrellas de neutrones en rotación. Pero el nombre persiste. ¿Podemos estar seguros de que Tommy Gold está en lo cierto? ¿Existen realmente estrellas de neutrones? Los astrofísicos tenían al respecto una sombra de duda hasta que se descubrieron las estrellas de rayos X. Hablaremos de ellas en el próximo capítulo.

IX. CUANDO LAS ESTRELLAS ROBAN MASA A OTRAS ESTRELLAS

Las estrellas dobles son objetos de gran rendimiento para el astrofísico, como ya hemos visto, porque aprende más de ellas que de las estrellas simples. Esto es válido no únicamente para las estrellas de rayos X que son el tema del siguiente capítulo, sino también para las estrellas normales que se han juntado formando un sistema doble. Durante un tiempo parecía como si las estrellas dobles demostraran que todas nuestras ideas sobre la evolución estelar estaban equivocadas. Algunos especialistas en estrellas dobles afirmaban tajantemente que las estrellas evolucionaban de modo fundamentalmente distinto al calculado con las simulaciones de computador de los años cincuenta y sesenta.

Motivaba estas dudas un determinado tipo de estrellas dobles que despertó la curiosidad por primera vez cuando, en 1667, el astrónomo boloñés Gemiani Montanari descubrió que la segunda estrella más brillante de Perseo brillaba a veces con mucha menor intensidad de lo normal.

ALGOL, LA CABEZA DEL DEMONIO

Tolomeo llamó a esta estrella la "cabeza de la Medusa" que sostenía en su mano el Perseo que dio el nombre a la constelación. Los judíos la llamaron "cabeza del demonio", los árabes Râs al ghûl, que significa literalmente "genio inquieto", y del nombre árabe procede la designación actual de la estrella: *Algol*. Montanari descubrió que era variable. Pasados más de cien años, John Goodricke, un

inglés de dieciocho años, explicó por qué. En la noche del 12 de noviembre de 1782 observó que la estrella tenía un brillo seis veces inferior al de antes. En la noche siguiente Algol volvió a la normalidad. El 28 de diciembre del mismo año se repetía el fenómeno. A las 17.30 Algol era débil, pero tres horas y media después volvía a brillar fuerte. Goodricke continuó observando y pronto tuvo la clave del asunto. Algol es una estrella normalmente luminosa, pero cada dos días y 21 horas su luminosidad desciende en un intervalo de 3 1/2 horas, hasta que la estrella alcanza algo menos de la sexta parte de su luz normal; durante las 3 1/2 horas siguientes la luminosidad sube de nuevo.

Goodricke ofreció inmediatamente la explicación que continúa siendo válida hoy en día. El inteligente joven, que, según hoy sabemos, no podía oír ni hablar, escribió lo siguiente en un artículo publicado en las "Philosophical Transactions" de la Royal Society de Londres: «Pensando que quizá no era demasiado para arriesgarse a formular una hipótesis sobre la causa de este cambio, tuve la idea de que difícilmente puede atribuirse el hecho a algo que no sea, o bien la interposición de un gran cuerpo que gira alrededor de Algol, o bien algún movimiento suyo que dirige regularmente hacia la Tierra una parte de su cuerpo cubierta de manchas o de algo semejante.» Tuvo que pasar un siglo hasta que su idea mereciera crédito. Hoy sabemos que la primera explicación era la correcta. Una estrella acompañante que gira alrededor de Algol se interpone cada 69 horas y la cubre parcialmente.

Cualquier persona puede observar este fenómeno a simple vista, con tal de que sepa qué posición ocupa Algol en el cielo. La estrella es casi siempre brillante y, por tanto, en general no se le ve nada extraño. Pero de vez en cuando Algol aparece tan débil como la estrella más cercana a ella, Rho Persei, que normalmente es mucho más débil.

Se conocen actualmente muchas estrellas variables que son ocultadas regularmente por una estrella acompañante: al principio del libro hemos citado ya la ocultación de la estrella zeta Aurigae. Por tanto, todas las variables de ocultación constituyen sistemas compactos, tan poco separados que ni los más modernos y sofisticados telescopios pueden distinguir individualmente cada componente. Pero el curso que sigue la ocultación permite conocer muchas más cosas sobre el par estelar, y lo que así se descubrió en relación a las *algólidas* parecía contradecir las ideas vigentes sobre la evolución estelar.

FUERZAS COMPLICADAS EN LAS ESTRELLAS DOBLES

Cuando una estrella acompañante gira en las proximidades de otra estrella, su materia no sólo capta la fuerza de la gravedad que la atrae hacia el centro de la propia estrella, sino también la fuerza de atracción que ejerce la segunda estrella. Además, en el movimiento mutuo de las estrellas también adquiere importancia la fuerza centrífuga.

Por tanto, la fuerza de atracción en las proximidades de una estrella se altera de modo muy complicado cuando está presente un segundo astro. Afortunadamente el matemático francés Edouard Roche, que trabajó en Montpellier a mediados del siglo pasado, descubrió algunas simplificaciones que todavía utilizan actualmente los astrofísicos.

Una estrella sola atraerá con su gravedad hacia su centro toda la materia situada a su alrededor. Pero en un sistema estelar doble actúa simultáneamente en cada punto la fuerza de atracción de la segunda estrella dirigida hacia su centro. Estas dos fuerzas pueden anularse total o parcialmente en los puntos donde las estrellas ejercen atracciones en direcciones opuestas (sobre la línea que une ambas estrellas) (véase fig. 9-1). Demos a estas estrellas los números 1 y 2. La fuerza de atracción de una masa disminuye muy rápidamente con la distancia, y en la proximidad inmediata de la estrella 1 predomina su fuerza de atracción, mientras que en la proximidad de la estrella 2 prevalece su fuerza de atracción. Podemos pues dibujar alrededor de cada estrella un volumen "permitido" dentro del cual todo el gas que llegue caerá continuamente hacia esta estrella. En este volumen permitido, llamado a menudo *volumen de Roche*, domina siempre la atracción de la estrella contenida en él. La sección plana de los volúmenes máximos permitidos da la curva discontinua de la figura 9-1. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que también actúan sobre el gas fuerzas centrífugas adicionales cuando éste participa en el movimiento orbital de una estrella alrededor de la otra. La materia situada fuera de los dos volúmenes de Roche dibujados en la figura 9-1 puede ser proyectada al exterior del sistema por la fuerza centrífuga o bien caer sobre una de las dos estrellas. La materia situada en el interior de cada volumen de Roche *tiene que caer* sobre la estrella correspondiente. El tamaño de los volúmenes permitidos depende de ambas masas estelares y de su separación y puede calcularse fácilmente para estrellas dobles bien conocidas.

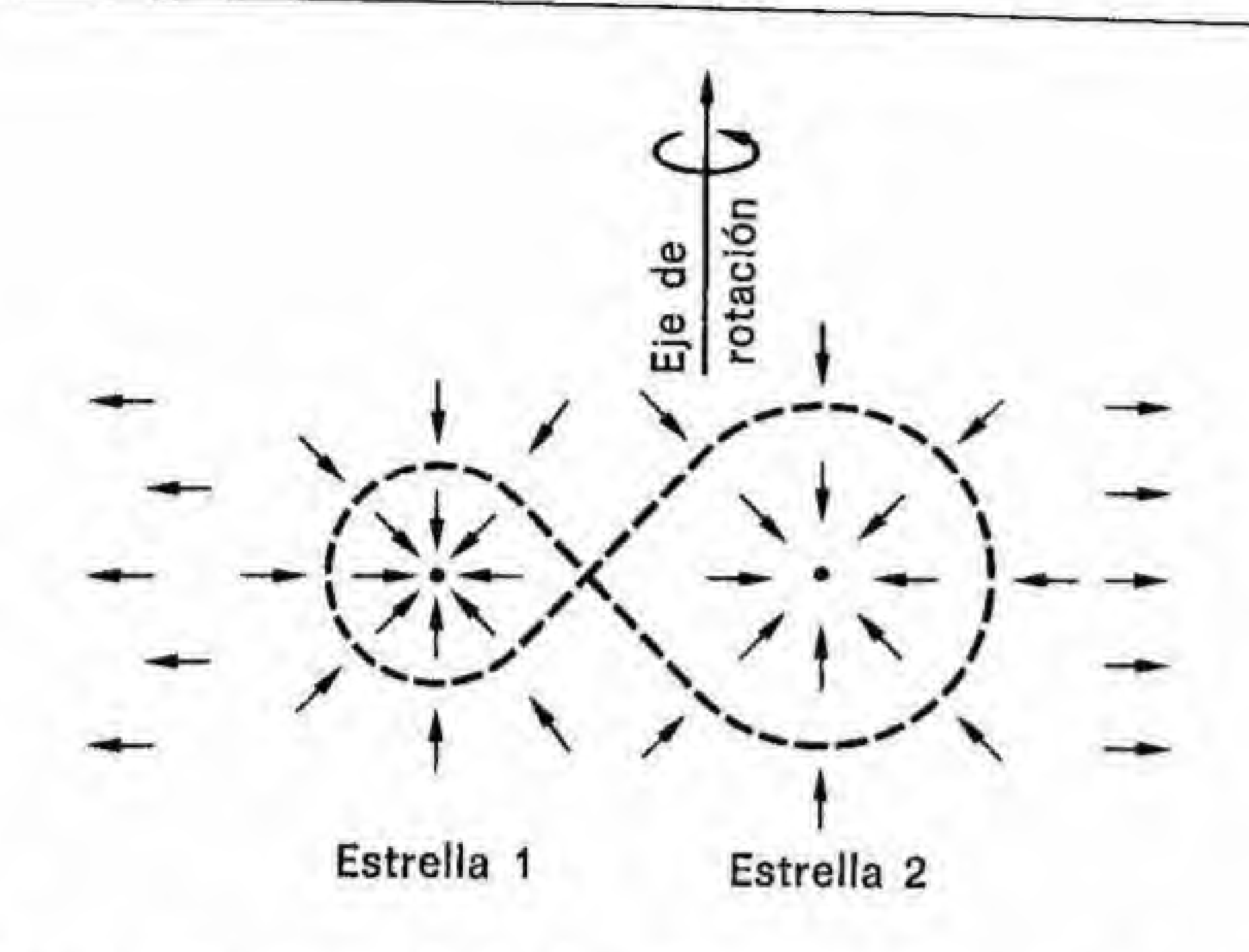


Fig. 9-1. Fuerzas presentes en un sistema estelar doble. Las dos estrellas están dibujadas como puntos. Las flechas indican en qué dirección actúa la fuerza sobre un átomo de gas situado en cada punto. En las cercanías de cada estrella domina su gravedad, y las flechas señalan o bien hacia la estrella 1 ó bien hacia la estrella 2. En la línea de unión de las dos estrellas hay un punto donde se equilibran exactamente las fuerzas de atracción de las estrellas. Las estrellas giran una alrededor de la otra (el eje del movimiento giratorio y la dirección de giro están indicados en la mitad superior del dibujo), y a gran distancia del eje (a la izquierda y a la derecha del dibujo) predomina la fuerza centrífuga y la materia tiende a proyectarse hacia fuera. Cada estrella dispone únicamente de un volumen máximo. Cuando la estrella se extiende y supera la región del espacio limitada por la curva de trazos, parte de su envoltura fluye hacia la otra estrella. El máximo volumen permitido de una estrella en un sistema estelar doble se llama también su *volumen de Roche.*

Cuando se observan estrellas dobles muy juntas, se encuentran con frecuencia sistemas en los que ambas estrellas son mucho más pequeñas que sus correspondientes volúmenes de Roche (véase figura 9-2 [a]). En la superficie de cada estrella domina la gravedad dirigida hacia su centro. Podemos decir *grosso modo* que ninguna de las estrellas nota la presencia de una compañera. No es pues de extrañar que estas estrellas dobles muy juntas, llamadas *sistemas separados,* no se distingan de las estrellas solas. Generalmente las dos estrellas pertenecen a la secuencia principal, viven de la fusión del hidrógeno y han gastado una proporción reducida de su combustible.

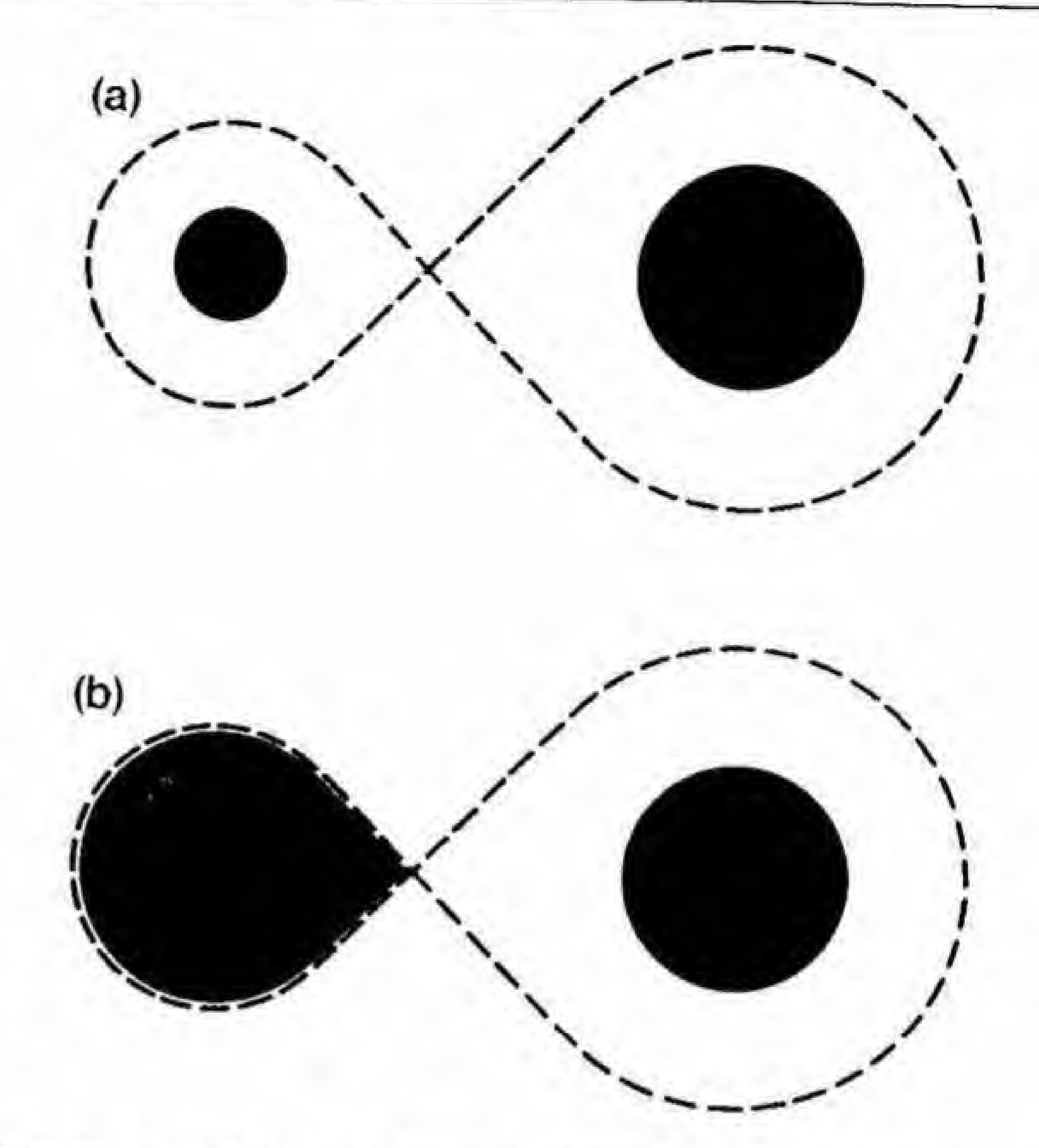


Fig. 9-2. Sistema estelar doble separado (a). Ambas estrellas están situadas claramente dentro de su volumen máximo permitido, que delimitan las curvas de trazos. — Sistema doble semiseparado (b). La estrella de la izquierda llena exactamente su volumen de Roche.

Sin embargo, también hay sistemas estelares dobles en los que sólo se observa con seguridad una estrella dentro de su volumen permitido, mientras que la otra llena su espacio hasta el límite. Se denominan *sistemas semiseparados* (véase fig. 9-2 [b]); el sistema de Algol es uno de ellos. Las dificultades empiezan con estos sistemas.

LAS PARADOJAS DE ALGOL Y DE SIRIO

La estrella de mayor masa del sistema semiseparado es menor que su volumen de Roche, y es una estrella normal de la secuencia principal. Muy distinto es el caso de la estrella de menor masa, que

llega hasta la misma frontera de su volumen permitido, y en el diagrama HR se sitúa a la derecha de la secuencia principal, desplazada claramente en dirección de las gigantes rojas (véase fig. 9-3). La estrella de mayor masa no ha agotado todavía su reserva de hidrógeno, pues todavía permanece en la secuencia principal; en cambio, la estrella de menor masa parece haber quemado ya el hidrógeno de su centro, y se dispone a emigrar al dominio de las gigantes rojas.

Sin embargo, esto contradice todas nuestras ideas sobre la evolución estelar. Hemos visto que la estrella de mayor masa debe evolucionar con mayor rapidez y agotar primero su reserva de hidrógeno. Ahora tenemos dos estrellas de igual edad, y la de menor masa muestra primero síntomas de agotamiento. No puede dudarse que ambas estrellas tienen la misma edad. Tuvieron que nacer juntas, porque una estrella no puede cazar otra estrella. ¿Por qué evoluciona más rápidamente la estrella de menor masa? ¿Son nuestras ideas sobre la evolución estelar básicamente incorrectas?

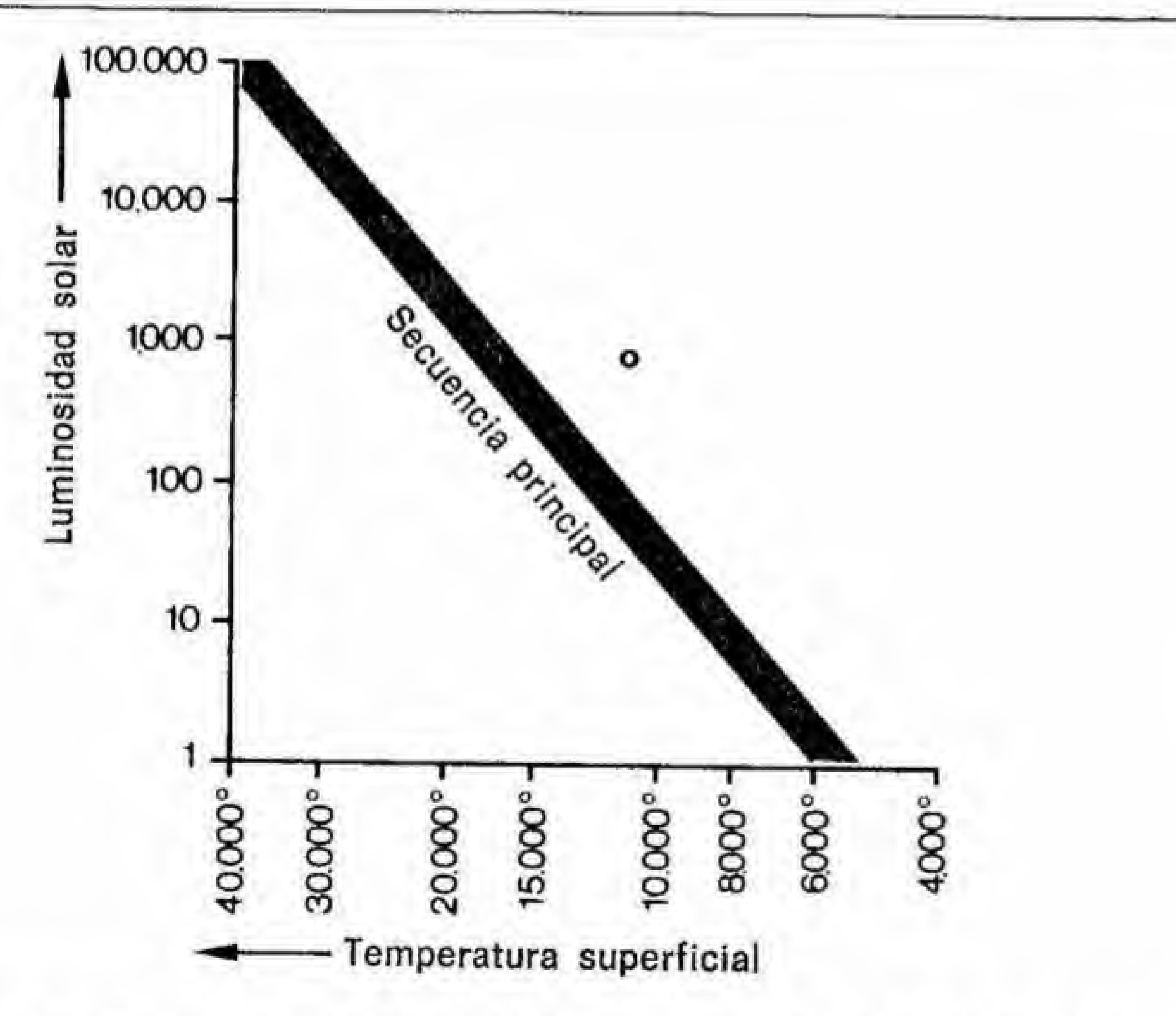


Fig. 9-3. En los sistemas estelares dobles semiseparados la estrella de mayor masa (círculo lleno) está situada todavía en la secuencia principal, mientras que la estrella de menor masa (círculo vacio) ha abandonado ya la secuencia principal. ¿Se contradice esto con las ideas vigentes de la evolución estelar, según las cuales debe abandonar primero la secuencia principal la estrella de mayor masa?

No es el sistema de Algol el único que parece contradecir nuestras ideas sobre la evolución; hay algunas estrellas dobles separadas que nos dejan todavía más perplejos.

Tenemos a Sirio, estudiado en otro capítulo, que forma con una enana blanca de sólo 0,98 masas solares un sistema estelar doble. De acuerdo con la historia evolutiva del Sol, calculada por computador, sabemos que una estrella cuya masa es inferior a una masa solar necesita por lo menos 10.000 millones de años para transformarse en una enana blanca. Y en tal caso ha de ser mucho más vieja que nuestro Sol actual. En cambio, la estrella principal del sistema de Sirio posee 2,3 masas solares y debería haber evolucionado mucho más rápidamente. Pero parece presentar todas las propiedades de una estrella subdesarrollada que todavía quema hidrógeno. Vemos de nuevo un sistema donde la estrella de mayor masa dispone de una buena reserva y, en cambio, la de menor masa está en una fase de agotamiento avanzado.

Sirio no es un caso excepcional y patológico: hay muchas estrellas dobles en las que una enana blanca de poca masa está asociada con una estrella poco evolucionada.

ESTRELLAS DOBLES EN EL COMPUTADOR

No está justificado dudar de los fundamentos de la teoría de la evolución estelar. Sus resultados concuerdan muy bien, por ejemplo, con las observaciones realizadas en cúmulos estelares. ¿Qué factor altera la evolución de una estrella de un sistema doble compacto y la diferencia de la evolución experimentada por la estrella de un cúmulo que vive a gran distancia de las demás estrellas? La causa sólo puede ser la atracción mutua.

Sin embargo, el efecto principal no es la deformación que la proximidad impone a estas estrellas dobles, porque sólo las capas más exteriores se desvían de la forma esférica propia de una estrella aislada, y estas capas no tienen prácticamente influencia alguna sobre la evolución. El efecto principal es que las estrellas no pueden crecer indefinidamente.

Imaginemos primero que una estrella aumenta cada vez más de tamaño, sin importarnos el motivo, hasta llenar totalmente su volumen máximo permitido. Toda ampliación posterior introduce

parte de sus capas superficiales en el volumen de Roche de su acompañante, con lo que la materia de la estrella en crecimiento ha de fluir necesariamente hacia su compañera. Éste es el nuevo factor en la evolución de los sistemas estelares dobles poco separados: con el tiempo la masa de una estrella puede cambiar de golpe, pues toda estrella aumenta de volumen cuando el hidrógeno de su zona central empieza a agotarse consumido por las reacciones nucleares que proporcionan energía al astro.

Supongamos un sistema estelar doble con una separación inicial clara, como el de la figura 9-2 (a). La estrella de mayor masa agota primero su hidrógeno y se dispone a convertirse en gigante roja. Pero pronto alcanza su volumen máximo. Si continúa ensanchándose, la masa deberá caer sobre su compañera. La continuación de la historia no es evidente de entrada.

El computador acude de nuevo en nuestra ayuda. De hecho, la evolución es casi la misma que la de una estrella única. Sólo hay que informar a la máquina de que la estrella dispone de un volumen espacial limitado. El computador ha de determinar en cada momento de la evolución este volumen, y compararlo con el de la estrella. Si la estrella es demasiado grande, el computador le quita materia de la superficie y calcula un modelo estelar para la estrella de masa reducida. La masa eliminada la traspasa a la otra estrella. El transporte de masa de una estrella a la otra altera las fuerzas de atracción de ambas, el período orbital y, por tanto, la fuerza centrífuga. El computador debe determinar de nuevo los volúmenes permitidos de que disponen ahora ambas estrellas y comprobar si después del intercambio de masa cada una de ellas está dentro de su volumen de Roche o si hay que trasladar más masa de una a otra. De este modo puede simularse en el computador una evolución con intercambio de masa, y se tiene un instrumento que permite estudiar con distintos ejemplos la historia de los sistemas estelares dobles.

Donald Morton ofreció la primera solución de la paradoja de Algol en su tesis doctoral dirigida por Schwarzschild y presentada a principios de 1960. En el año 1965, cuando se había aprendido ya a completar en el computador fases difíciles de la evolución estelar, Alfred Weigert y yo atacamos en Gotinga el problema. Calculamos entonces toda una serie de historias evolutivas de sistemas estelares dobles. Quisiera presentar aquí dos de estos ejemplos.

LA HISTORIA DEL PRIMER PAR ESTELAR: SE CREA UN SISTEMA SEMISEPARADO

Es el par que calculamos primero. Inicia su evolución con dos estrellas de la secuencia principal de nueve y cinco masas solares, que giran una alrededor de la otra con un período de 1,5 días y una distancia de 13,2 radios solares. Primero evoluciona la estrella de más masa, mientras la velocidad evolutiva de la otra es casi imperceptible. La estrella de nueve masas solares gasta cada vez más su hidrógeno y sus capas exteriores se dilatan lentamente. Al cabo de 12,5 millones de años, el contenido de hidrógeno de su centro se ha reducido a la mitad, y la estrella se ha hinchado tanto que llena exactamente su volumen permitido. Ahora está en el punto *a* de su trayectoria evolutiva en el diagrama HR de la figura 9-4. Cualquier aumento que experimente superará el volumen permitido y la masa deberá fluir hacia la acompañante.

Los cálculos demuestran que no basta una pequeña transferencia de masa para reducir el volumen estelar. Se produce una auténtica catástrofe que dura 60.000 años. Durante este intervalo la estrella pierde 5,3 masas solares de las 9 de que disponía al principio y las entrega a su acompañante, que ahora dispone de $5+5{,}3=10{,}3$ masas solares. La estrella acompañante ha succionado tanto gas estelar que ahora posee más masa que la otra. Los papeles de estrella de mayor masa y estrella de menor masa se han invertido en un intervalo temporal breve si se compara con la vida de una estrella. La estrella desangrada está ahora en el punto *b* del diagrama HR. Cuando era la estrella de mayor masa había quemado ya una parte notable de su hidrógeno y, por tanto, es una estrella evolucionada, situada a la derecha de la secuencia principal. Después de haber encontrado la paz vive un período de evolución más lenta, gastando el hidrógeno que queda en su centro. De este modo va aumentando lentamente de volumen y durante los 10 millones de años siguientes continúa entregando masa a su compañera. La estrella que dispone ahora de mayor masa empieza a envejecer lentamente después del traspaso repentino de masa. Pero permanecerá todavía durante millones de años en la secuencia principal. Durante este tiempo nuestro sistema ofrece las características típicas de las estrellas Algol: la estrella de mayor masa permanece sin haber evolucionado en la secuencia principal, en cambio la de menor masa ha abandonado la secuencia principal y llena de modo exacto su volumen permitido.

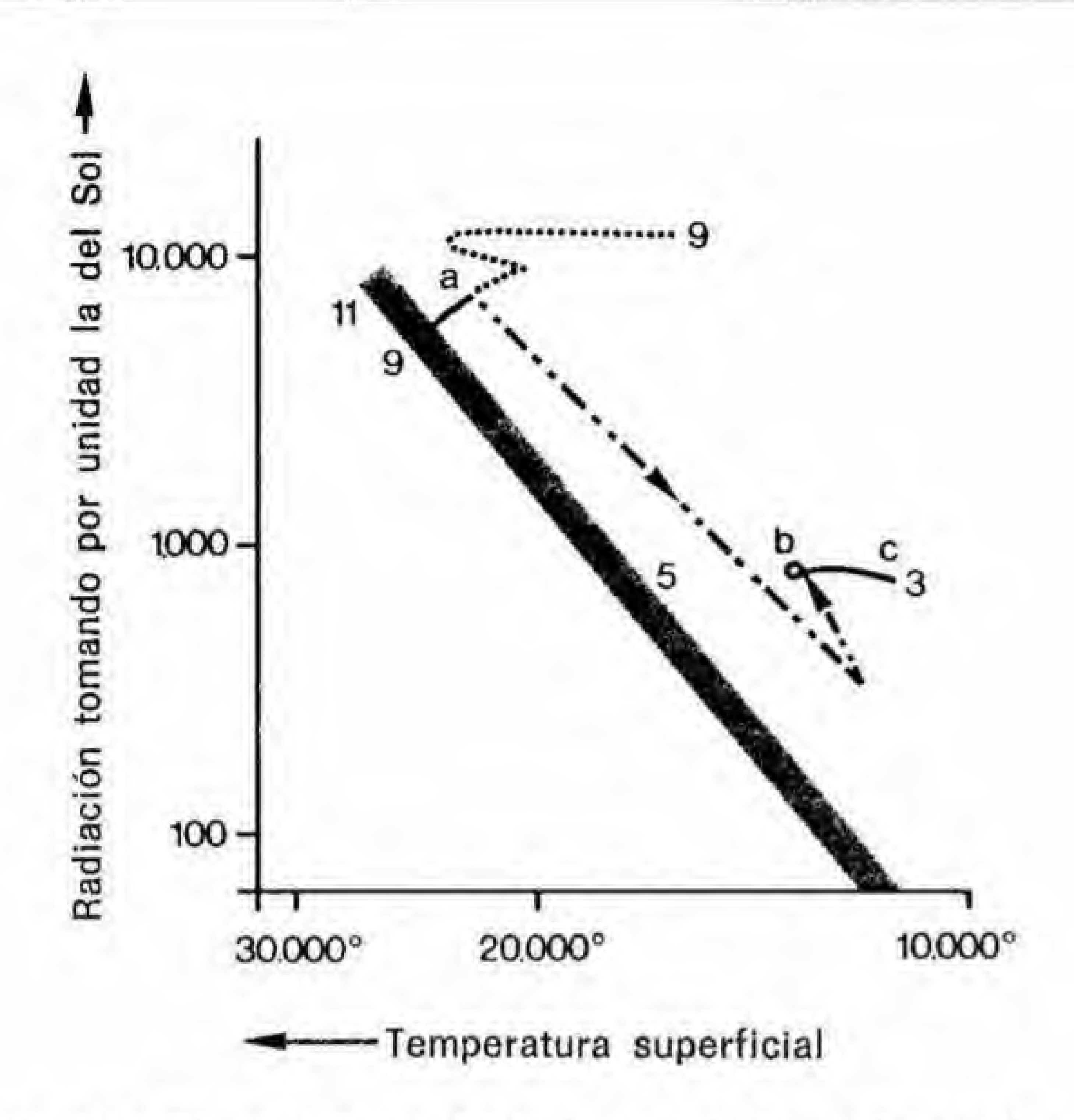


Fig. 9-4. Evolución de un sistema doble compacto formado por dos componentes de 5 y 9 masas solares. El agotamiento de la reserva de hidrógeno se hace notar primero en la estrella de mayor masa. Debería pues convertirse en una supergigante roja siguiendo la trayectoria evolutiva de puntos. Pero antes de agotar totalmente el hidrógeno de su centro, alcanza su máximo volumen permitido. Pasa por una fase de rápido intercambio de masa y se desplaza a lo largo de la curva de trazos hacia *b*, mientras que la estrella que gana masa sube por la secuencia principal. La estrella que antes tenía más masa y ahora menos, completa entre *b* y *c* la fusión del hidrógeno de su región central. En *c* contiene ya sólo 3 masas solares, mientras que su acompañante dispone ahora de 11 masas solares. (Las masas están indicadas, en unidades de masa solar, a lo largo de la trayectoria evolutiva y de la secuencia principal.)

Nosotros observamos en la Vía Láctea únicamente sistemas *anteriores* al intercambio de masa (es decir, sistemas separados) o sistemas *posteriores* (o semiseparados) porque el intercambio se realiza en un tiempo 200 veces más corto que el necesario para la evolución anterior o posterior al intercambio. Por lo tanto, la probabilidad de coger *in fraganti* a una pareja así en este breve intervalo de tiempo es 200 veces menor. Donald Morton, en su tesis publicada cinco años antes, había previsto, en principio, correctamente este hecho.

LA HISTORIA DEL SEGUNDO PAR ESTELAR: NACE UNA ENANA BLANCA

Intervino también en estos cálculos Klaus Kohl, quien más tarde se pasó a la industria informática. Escogimos estrellas de poca masa y situamos a estrellas de una y de dos masas solares a una distancia de 6,6 radios solares. Las figuras 9-5 y 9-6 representan los resultados en el diagrama HR y en un cuadro a escala real respectivamente.

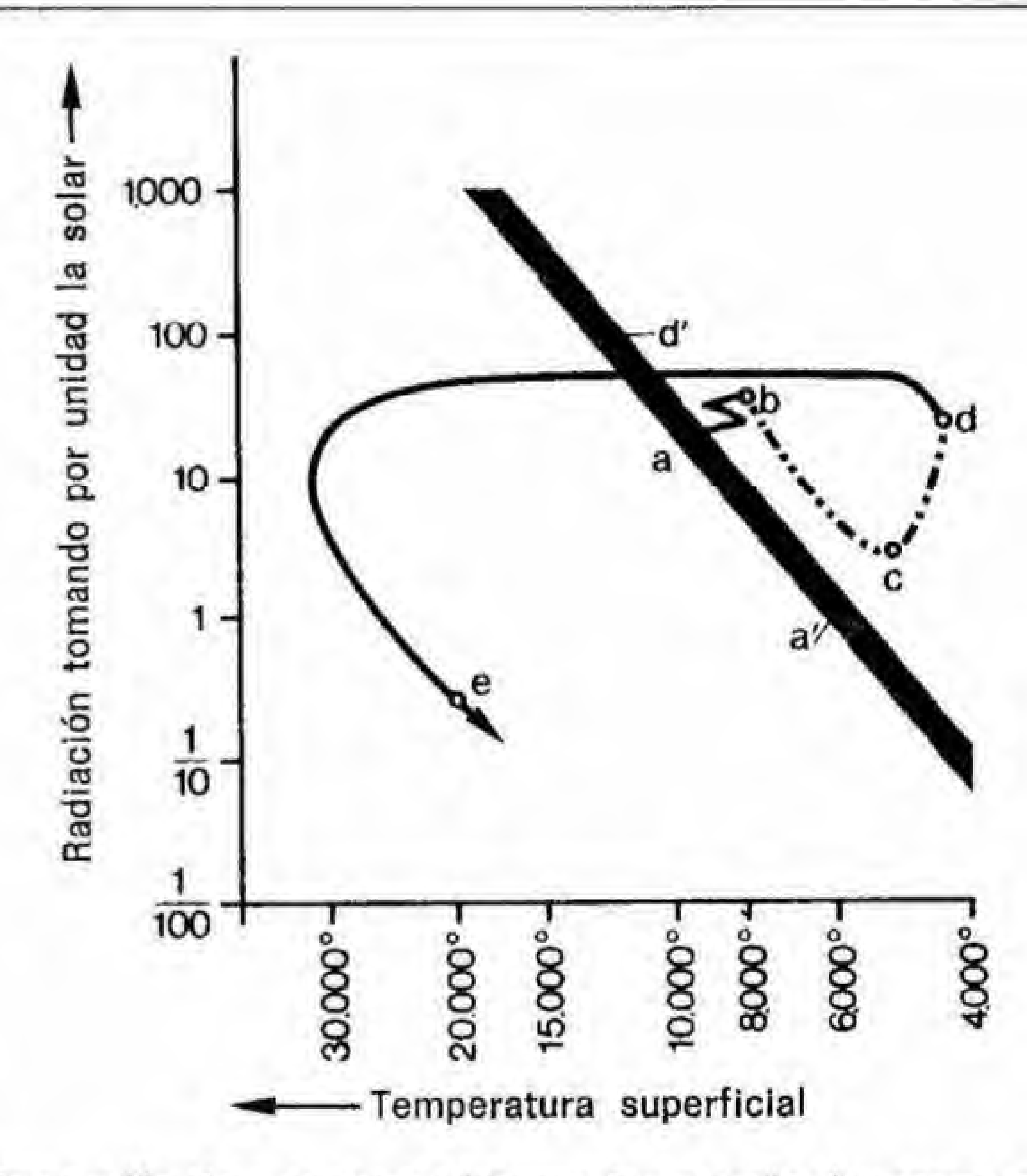


Fig. 9-5. Formación de una enana blanca. La estrella de mayor masa, formada por dos masas solares, parte de *a* en la secuencia principal; la otra, que tiene la masa del Sol, parte de *a'*. La estrella de mayor masa evoluciona primero y alcanza en *b* su volumen de Roche. Entrega entonces masa a su acompañante y se desplaza a lo largo de la trayectoria evolutiva de trazos. En *d* ha finalizado ya el intercambio de masa. La estrella, que conserva solamente 0,26 masas solares, se convierte en el trayecto hacia *e* en una enana blanca. La estrella acompañante se desplaza por la secuencia principal con masa creciente hacia *d'*. Comparar este dibujo con el de la figura 9-6.

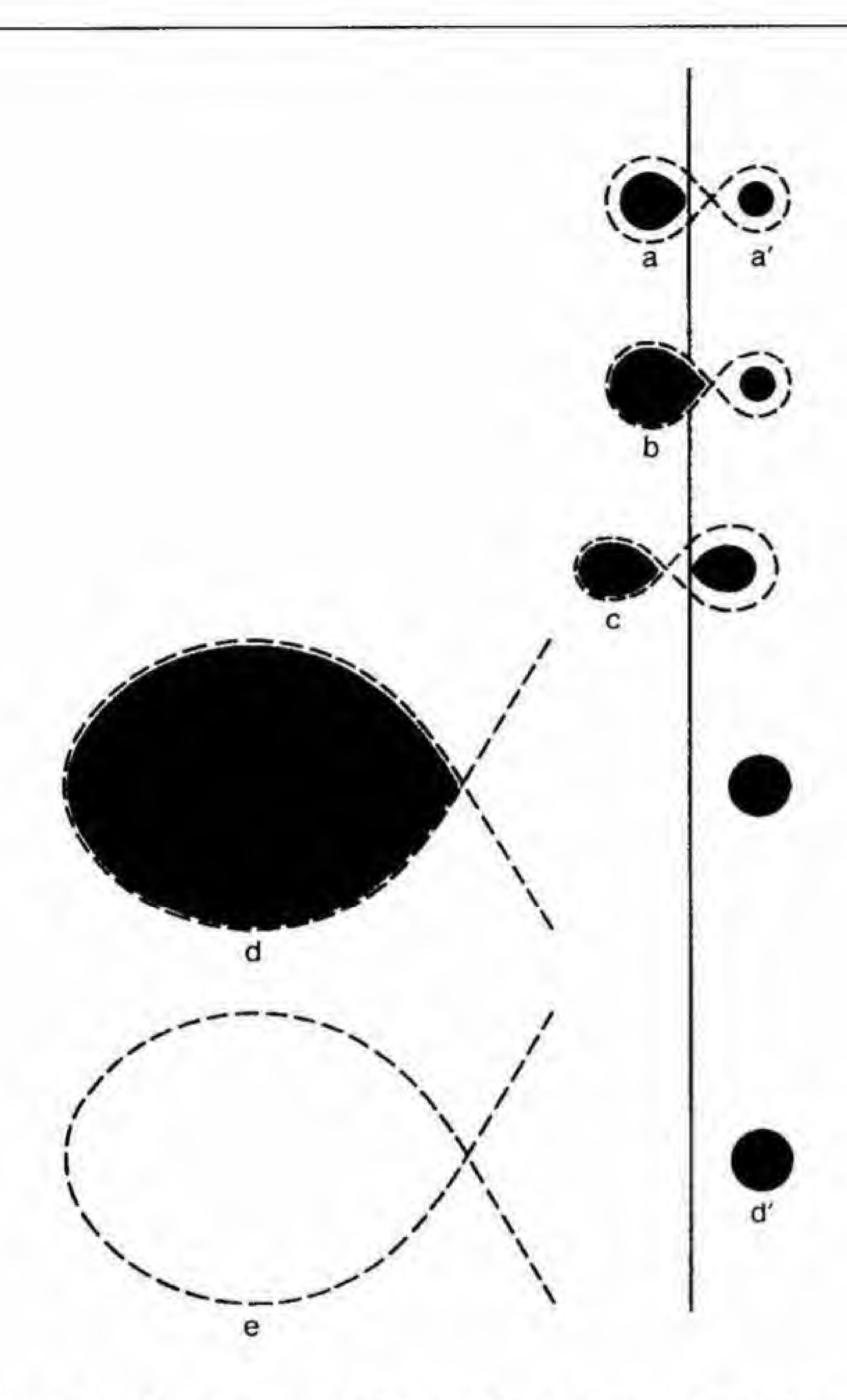


Fig. 9-6. La evolución descrita en la figura 9-5, representada aquí a escala única. Las letras corresponden a las de los puntos del diagrama HR de la figura 9-5. Los volúmenes máximos de que dispone cada estrella (volúmenes de Roche) están dibujados con trazos. Como es lógico, al producirse el intercambio de masa la separación de ambas estrellas puede cambiar mucho. Si las dos estrellas se separan, los volúmenes máximos permitidos aumentan. La recta vertical es el eje de rotación del sistema estelar doble. Al principio, las dos estrellas de la secuencia principal giran una alrededor de la otra (arriba), pero al final (abajo) se tiene una estrella de la secuencia principal (derecha) y una diminuta enana blanca (izquierda).

También ahora la estrella de gran masa evoluciona primero y aumenta continuamente de radio. Sin embargo, la distancia escogida es tal que cuando la estrella ha alcanzado su volumen máximo permitido ha transformado ya completamente en helio el hidrógeno de su centro. El momento crítico para esta estrella llega al cabo de 570 millones de años. Al igual que en el primer caso, también ahora se produce de entrada un transporte de masa muy rápido (en 5 millones de años) que transfiere una masa solar, aproximadamente, de una estrella a la otra y luego otro transporte cada vez más lento (en total 120 millones de años), al finalizar el cual, a la estrella de dos masas solares iniciales sólo le quedan 0,26. La estrella ha perdido casi toda su envoltura rica en hidrógeno. Le queda el helio que se ha formado en las capas profundas mediante las reacciones nucleares de la combustión del hidrógeno. Nuestra estrella actual de 0,26 masas solares está formada por un núcleo de helio, sobre el cual descansa una envoltura muy extensa de hidrógeno de baja densidad. Al final del proceso de pérdida de masa, la estrella se ha convertido en una gigante roja. Los cálculos permiten, al contrario que las observaciones, penetrar en el interior de esta estrella gigante. Casi todo el volumen de diez radios solares está ocupado por los gases muy enrarecidos de su envoltura de hidrógeno. El 99 % de su masa está compuesta por helio, comprimido en una pequeña esfera central cuyo diámetro es una veinteava parte del Sol. Tenemos aquí a la enana blanca dentro de la gigante roja. Pero nuestra estrella dispone todavía de una envoltura extensa. Al finalizar el proceso de pérdida de masa sus fuerzas expansivas se han agotado, y el gas cae continuamente hacia la pequeña esfera central de helio. Su radio disminuye entonces enormemente, y también desde fuera la estrella se parece cada vez más a una enana blanca. En el diagrama HR se desplaza hacia la parte inferior izquierda, la región de las enanas blancas.

¿Qué le ha pasado, mientras tanto, a su compañera? Al principio, cuando la estrella de mayor masa perdía materia, capturó de ella un total de 2 − 0,26 = 1,74 masas solares. De nuevo se han invertido los papeles de estrella principal y estrella secundaria. Pero la estrella que ahora posee mayor masa (2,74 masas solares) no ha tenido tiempo todavía de evolucionar a fondo a pesar de la ganancia de masa; en cambio la otra estrella ya se ha convertido en una enana blanca. Los cálculos proporcionan la prueba de que a partir de un par estelar de formación simultánea puede formarse una enana blanca junto a una estrella de mayor masa no evolucionada y

perteneciente a la secuencia principal, como observamos en el sistema de Sirio.

Se han resuelto las paradojas y dificultades aparentes. Las observaciones de estrellas dobles proporcionan ahora una confirmación adicional de que las ideas básicas de la teoría de la evolución estelar son correctas en sus rasgos esenciales.

Observamos en el cielo muchos sistemas separados, cuyas masas y distancias son tales que en el futuro, cuando empiece a agotarse el hidrógeno de la componente de mayor masa, el correspondiente transporte de masa tendrá lugar del modo descrito, quedando al final una enana blanca.

De todos modos, no es absolutamente seguro que la historia que acabamos de contar de un sistema estelar doble que da al final una enana blanca describa realmente el sistema de Sirio. Algunas características de este par estelar dejan un margen de duda. Ya hemos visto que también las estrellas solas pueden liberarse de su envoltura mediante el viento estelar o formando una nebulosa planetaria, y transformarse así en una enana blanca. Quizás el sistema de Sirio no ha experimentado nunca un intercambio de masa, quizá la estrella de mayor masa proyectó por sí sola su envoltura al espacio, y sólo una parte reducida de esta masa cayó sobre la estrella acompañante, mientras la parte principal escapaba al espacio. También en este caso se resuelve la paradoja, porque la estrella de mayor masa inicial evolucionó primero con mayor rapidez que la estrella que tiene ahora más masa. En ambos casos, la estrella que ahora tiene menor masa era originalmente la que tenía más.

El intercambio de masa entre las componentes de un sistema estelar doble juega también un papel en el *fenómeno de las novas*. Se conocía desde la antigüedad la existencia de estas estrellas con intensas explosiones de luz, pero desde 1945 empezó a imponerse la idea de que probablemente todas eran estrellas dobles de poca separación.

LA NOVA DEL 29 DE AGOSTO DE 1975 EN EL CISNE

Quien en la noche del 29 de agosto de 1975 estuviera mirando el cielo y tuviera por lo menos una idea aproximada de las constelaciones más importantes, debió de sorprenderse ante la novedad que ofrecía el Cisne. Se veía en aquella constelación una estrella nueva. Los observadores de países situados más hacia Oriente la vieron primero, porque allí se hizo antes de noche y salieron antes las estrellas. Cuando llegó el crepúsculo a nuestro país muchas personas descubrieron la nueva estrella aparecida en el cielo (véase figura 9-7). Los astrónomos aficionados fueron a buscar sus telescopios y los profesionales acudieron presurosos a las cúpulas de observación de sus observatorios. ¿Ocurría por fin lo que todos esperábamos desde la época de Kepler? ¿Había estallado por fin una supernova en nuestra galaxia? ¿Estábamos presenciando la formación de una estrella de neutrones, como la supernova de la nebulosa Cangrejo?

Actualmente la estrella del Cisne es un objeto débil y apenas visible que sólo puede captarse con telescopio. No era la estrella prometida que esperábamos desde hacía tanto tiempo, no era una supernova sino una simple *nova*.

Durante el año 1909 se supo, por primera vez, que el fenómeno de las supernovas cuenta con una edición pequeña e inofensiva. Aquel año empezaron a brillar en la nebulosa de Andrómeda dos estrellas cuya intensidad era mil veces inferior a la de la supernova que Hartwig había descubierto catorce años antes en aquella galaxia. Hoy sabemos que aquella explosión de energía era semejante a la de otras estrellas de nuevo brillo observadas desde siempre en nuestra galaxia. En 1901 se había visto una manifestación especialmente interesante de este fenómeno en nuestra galaxia dentro de la constelación de Perseo.

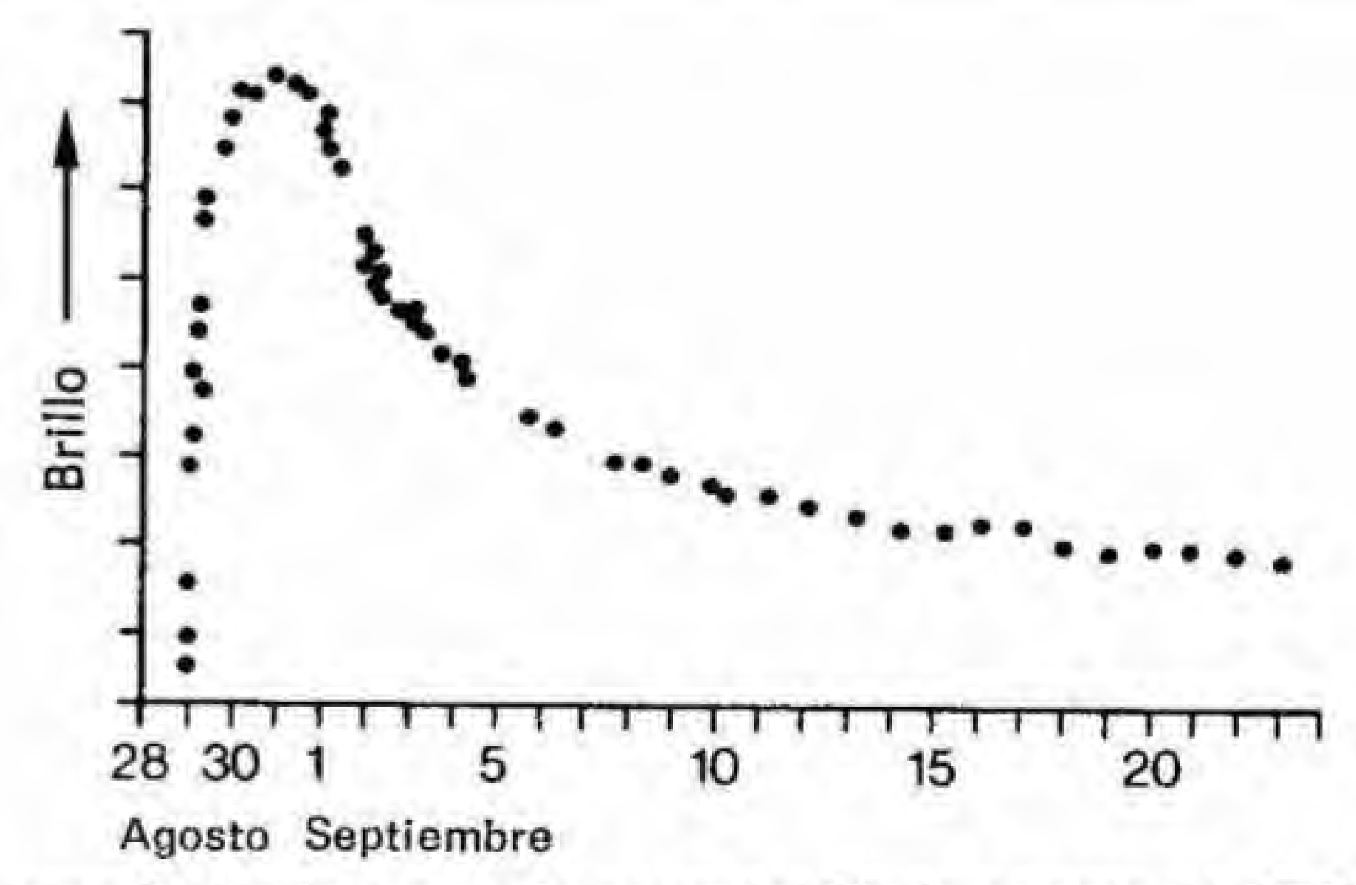


Fig. 9-7. Explosión luminosa de la nova del 29 de agosto de 1975 en la constelación del Cisne. Los puntos representan observaciones discretas de luminosidad en tiempos determinados.

Las novas, como llamamos a estas estrellas cuyo brillo aumenta repentinamente, no tienen nada que ver con el fenómeno de las supernovas. Son mucho más débiles, pero aparecen con mayor frecuencia. Solamente en la nebulosa de Andrómeda, una galaxia vecina, se observan cada año de 20 a 30 novas. Pronto se descubrió, estudiando fotografías más antiguas, que en el punto donde aparecía una nova había antes una estrella. La estrella, unos años después de encenderse en forma de nova, recupera sus antiguas características. Tenemos, pues, una estrella cuyo brillo aumenta de modo explosivo y que luego vuelve a su antiguo estado.

A menudo, en las proximidades de la nova vuelta a la normalidad se observa una pequeña nebulosidad, que se extiende a gran velocidad, y que sin duda fue proyectada por la erupción. Pero a diferencia de las nubes explosivas de las supernovas, estas nebulosidades contienen poca masa. La estrella no ha explotado, sólo ha perdido algo de masa, probablemente menos de una milésima parte.

LA NOVA DEL AÑO 1934

¿Qué clase de estrellas son estas que después de permanecer en el cielo apenas visibles se ponen a brillar en un solo día con una intensidad diez mil veces mayor, para irse debilitando en los meses siguientes, y volver al cabo de los años al oscuro estado en que vivían antes de su breve intervalo de gloria?

Un ejemplo típico de estas estrellas es la nova que apareció en diciembre de 1934 en Hércules. Llegó entonces a brillar más que todas las estrellas de su constelación. En abril de 1935 su luminosidad bajó fuertemente, y luego volvió a subir algo, pero manteniéndose debajo del límite de visibilidad del ojo humano. Actualmente puede observarse con telescopios de potencia mediana.

¿Qué podemos aprender de este débil objeto? Lo más importante es que la exnova, una vez estudiada con detenimiento, resulta ser un sistema estelar doble. Descubrió este hecho el americano Merle F. Walker, en 1954, en el observatorio Lick. Dos estrellas giran una alrededor de la otra con un período de 4 horas y 39 minutos. Sabemos muchas cosas más sobre estas estrellas porque al ir girando se ocultan mutuamente. Una de ellas es una enana blanca con la masa del Sol. La otra es probablemente una estrella de la secuencia principal, de poca masa. Pero hay más sorpresas. La estrella de la secuencia principal llena justamente su volumen permitido, y de su superficie fluye materia hacia la enana blanca. Tenemos ante nosotros un sistema semiseparado parecido al de Algol, con flujo de gas de una estrella a la otra; pero, en este caso, la materia cae sobre una enana blanca.

Sabemos más cosas todavía. La materia no se precipita inmediatamente sobre la enana. El sistema entero gira y la fuerza centrífuga obstaculiza el movimiento, con lo que la materia gaseosa en tránsito se concentra primero en un anillo que rodea a la enana blanca. La materia de este anillo llueve lentamente sobre la enana (véase fig. 9-8). Nosotros no vemos directamente el anillo. Pero a medida que el sistema gira, la estrella de la secuencia principal se desplaza lentamente delante del disco anular y lo va ocultando sección por sección. Esto se refleja en la emisión de la luz observada, a la que contribuye también el disco anular brillante. No solamente se ha estudiado la estructura y extensión del anillo, sino que, además, se sabe que la temperatura en la región del anillo donde cae la materia

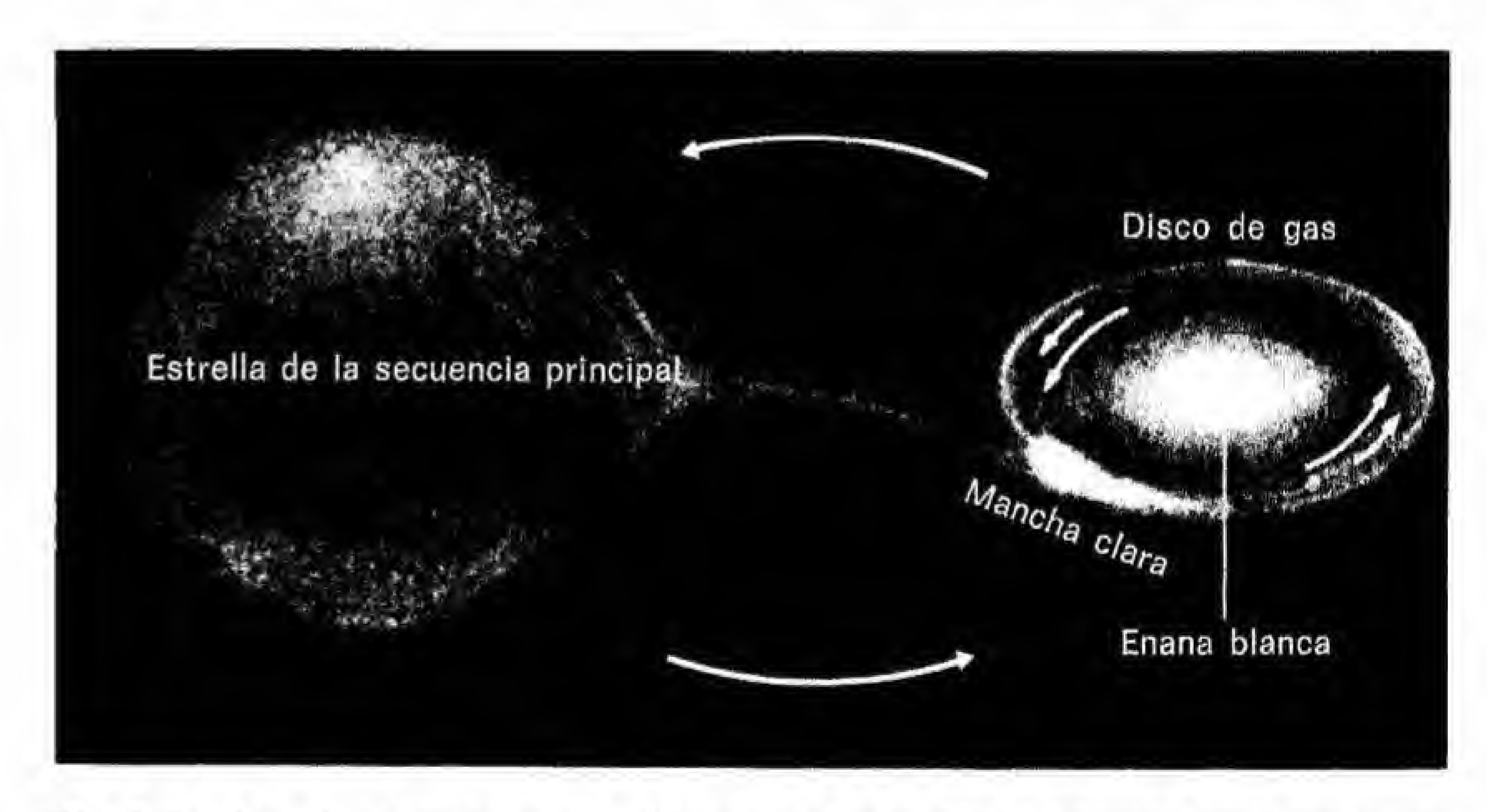


Fig. 9-8. Los dos componentes del sistema estelar doble de una nova giran uno alrededor del otro según indican las flechas exteriores. Una estrella de la secuencia principal llena su volumen máximo permitido. Gas procedente de su superficie fluye hacia la enana blanca acompañante. Pero la materia gira primero dentro de un disco antes de precipitarse sobre la enana blanca. Las flechas interiores indican el movimiento en este disco. En el punto donde la corriente de gas procedente de la estrella de la secuencia principal choca contra el disco rotatorio, se observa una mancha caliente y brillante.

procedente de la estrella de la secuencia principal es muy elevada. El anillo tiene una mancha caliente en el lugar donde la corriente gaseosa de la estrella de la secuencia principal queda frenada, y donde parte de su movimiento se transforma en calor. Se ha descubierto, además, que la enana blanca del sistema de la nova de Hércules varía de brillo con un ritmo periódico de 70 segundos.

Siempre que se ha podido investigar con detalle una exnova ha podido descubrirse que se trata de un sistema estelar doble, compuesto por una estrella de la secuencia principal que rocía con materia una enana blanca. Hay también estrellas emparentadas con las novas, las llamadas *novas enanas*. Sus erupciones luminosas son mucho más débiles, y se repiten de modo no muy regular. También son estrellas dobles de este tipo.

EXPLOSIONES NUCLEARES EN UN SISTEMA ESTELAR DOBLE

¿Qué proceso permite en un sistema estelar doble de este tipo liberar de golpe una cantidad tal de energía, que obliga al sistema a emitir durante un breve período diez mil veces más luz que antes?

La idea que condujo a la resolución de este problema se debe a Martin Schwarzschild, a Robert Kraft, que trabaja ahora en el Observatorio Lick, y a los cálculos que llevaron a cabo en los años sesenta, en Gotinga, Pietro Giannone, actualmente del Observatorio de Roma, y Alfred Weigert. Sumner Starrfield, de la Arizona State University en Tempe, Arizona, y sus colaboradores ampliaron y elaboraron la idea.

Una enana blanca conserva en su interior una temperatura suficiente para quemar hidrógeno; pero la enana blanca se formó en el centro de una gigante roja y todo su hidrógeno se ha transformado desde hace tiempo en helio. Es posible, incluso, que el helio se haya transformado, a su vez, en carbono. Por tanto, una enana blanca carece de hidrógeno en su interior. Pero el gas que cae sobre la enana blanca procedente de la vecina estrella de la secuencia principal es rico en hidrógeno. Esta materia cae primero sobre la superficie relativamente fría de la estrella enana, donde la temperatura es demasiado baja para que el hidrógeno entre en ignición. Se forma así en la superficie una envoltura de materia rica en hidrógeno cuyo espesor aumenta con el transcurso del tiempo. Además, esta envoltura se calienta en su fondo, en la zona de contacto con la materia original de la enana blanca. El calentamiento va progresando hasta que la temperatura alcanza en este punto unos 10 millones de grados. Entonces el hidrógeno se enciende y una gran explosión proyecta al espacio toda la envoltura de hidrógeno. Starrfield y sus colaboradores han intentado calcular con un computador esta bomba de hidrógeno en la superficie de una enana blanca, y al parecer esta bomba explica el fenómeno de las novas.

Apoya esta explicación el hecho de que algunas novas, o quizá todas, repitan sus explosiones. Así, en el año 1946, se observó en la constelación de la Corona boreal una nova que ya había brillado en 1866. Se han observado incluso tres y más explosiones de una misma nova (véase fig. 9-9). El hecho concuerda bien con nuestro cuadro. Después de la explosión, la estrella de la secuencia principal, a la cual no le ha pasado nada, continúa alimentando la enana blanca con materia rica en hidrógeno. Se forma de nuevo una envoltura altamente explosiva sobre la superficie de la enana, la cual explotará de nuevo cuando se encienda el hidrógeno.

Hasta ahora no se ha podido demostrar que la exnova de la explosión registrada en el Cisne, en 1975, sea un sistema estelar doble. Por ello, los astrofísicos están considerando la posibilidad de que se forme una envoltura rica en hidrógeno sobre una enana blanca *aislada,* si se concentra sobre su superficie gas de la materia interestelar. Pero estas consideraciones son probablemente prematuras, y quizás el sistema tiene que calmarse antes de que pueda observarse libremente como un sistema estelar doble del tipo comprobado en las demás exnovas. También pudiera ser que no nos enteráramos ni entonces. Porque cuando observamos perpendicularmente el plano orbital de un sistema estelar doble, no podemos

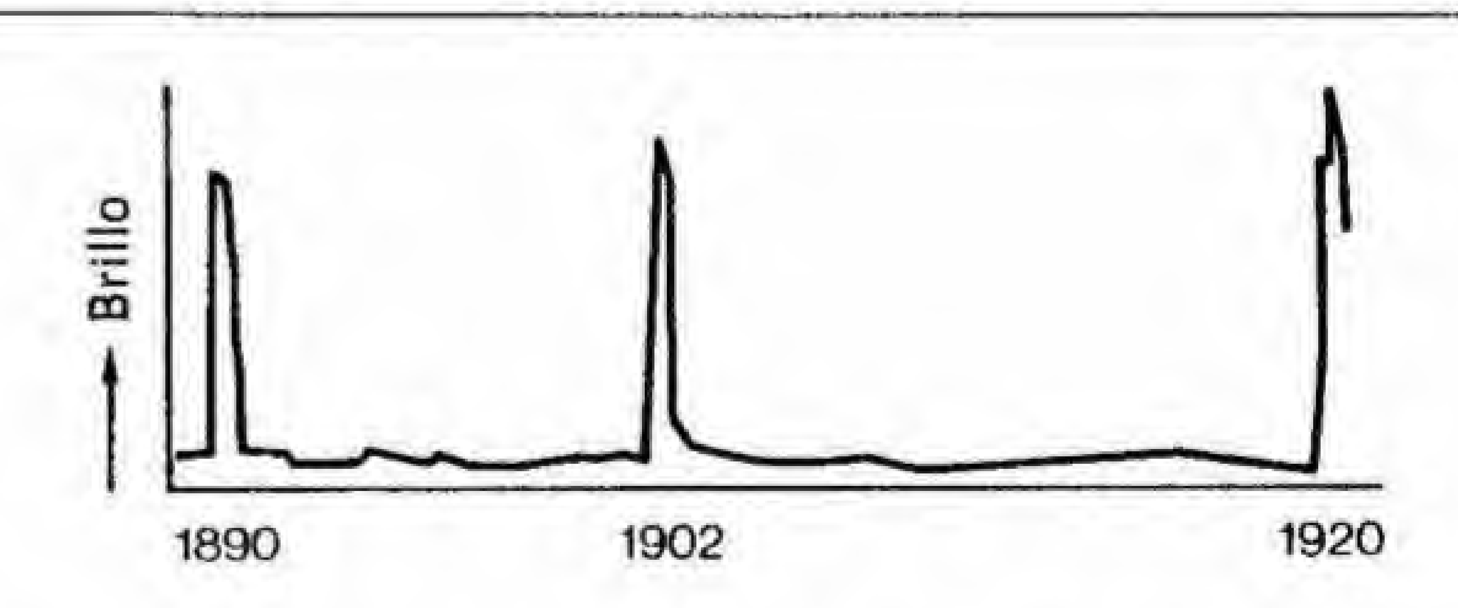


Fig. 9-9. Las explosiones de la nova T Pyxidis se repiten a intervalos regulares. Se observaron explosiones en los años 1890, 1902, 1920, 1944 y 1966.

captar mediante el efecto Doppler el movimiento mutuo de las dos estrellas (véase el Apéndice A), ni la ocultación mutua de las componentes permite captar la naturaleza doble del sistema.

Los sistemas estelares dobles de poca separación en los que fluye gas de una estrella a la otra, nos han ofrecido toda una serie de nuevos fenómenos. Hemos resuelto las paradojas aparentes de las estrellas de Algol, el enigma de la edad de sistemas estelares dobles como el de Sirio. Las estrellas dobles nos han regalado el fenómeno de las novas. Pero también entran en categoría los astros quizá más excitantes del momento actual: las estrellas dobles de rayos X.

X. ESTRELLAS DE RAYOS X

El profesor Röntgen disertó, ayer por la tarde, en la Sociedad de Física ante profesores y generales sobre sus rayos X y fue objeto de entusiastas ovaciones... Las diversas demostraciones se desarrollaron a la perfección, y los rayos atravesaron el papel, la lata, la madera, el plomo y, finalmente, la mano de Röntgen y del profesor Köllicker... Köllicker propone llamar al nuevo descubrimiento "rayos Röntgen" (grandes aplausos). Röntgen da las gracias profundamente conmovido. Köllicker hizo un brindis en honor de Röntgen. Desde hace 48 años no ha tenido lugar una sesión tan trascendental de la Sociedad. Asistieron también a ella numerosos estudiantes y público en general.

"Fränkisches Volksblatt" del 24 de enero de 1896

Este capítulo se ocupa de estrellas que no emiten energía perceptible para el ojo, como la del Sol; son estrellas cuya radiación está situada en un dominio de longitudes de onda para el cual carecemos de sentidos, una radiación que era absolutamente desconocida para el hombre, hasta que Wilhelm Conrad Röntgen la descubrió casualmente en 1895 en la ciudad de Würzburg.

A primera vista puede parecer sorprendente que se generen rayos X (o rayos Röntgen) en el Cosmos. Cuando vamos a visitarnos a un consultorio médico comprobamos lo complicado que ha de ser un aparato capaz de generar estos rayos. ¿Cómo pueden generarse también en el Cosmos? En principio, el proceso es el mismo: en el

aparato médico se frenan repentinamente electrones de alta velocidad y esto genera una radiación. Cuando en la naturaleza se eleva un gas a una temperatura de millones de grados, sus electrones se mueven a gran velocidad. Y cuando uno de estos electrones llega a las proximidades de un núcleo atómico, su movimiento se frena o se desvía en el campo eléctrico del núcleo, creándose el mismo tipo de radiación que en el tubo de rayos X.

La corona, o sea, la envoltura gaseosa que rodea el globo solar, tiene una temperatura de unos 2 millones de grados. En ella, los electrones rápidos se frenan y se aceleran continuamente al chocar con los núcleos atómicos. Ambos procesos crean luz de rayos X, y la corona solar envía rayos X al espacio que pueden fotografiarse desde satélites. Es decir, que una estrella tan inofensiva como nuestro Sol nos demuestra que en el espacio pueden generarse rayos X. Pero mientras el Sol sólo envía una parte insignificante de su energía en forma de rayos X, las estrellas de rayos X son objetos puntuales en el cielo que emiten la mayor parte de su radiación en el dominio de los rayos X. Las conocemos desde hace unos pocos años, y lo que hemos ido aprendiendo en estos años las convierte en astros de enorme interés.

LA HISTORIA DE UHURU

Los rayos X procedentes del espacio no pueden atravesar la atmósfera de nuestro planeta, y son absorbidos en las capas más altas del aire. La astronomía de rayos X se inició cuando pudieron elevarse en globos a las capas superiores de la atmósfera terrestre telescopios manejados a distancia o cuando se enviaron en cohetes al espacio. Las primeras mediciones de rayos X tenían por objetivo principal el Sol, a fin de medir los rayos X procedentes de la corona solar, pero pronto se inició la búsqueda de rayos X procedentes de otras direcciones del espacio. Se abrió así un nuevo capítulo en la astrofísica moderna.

Hoy en día, generalmente, cuesta reconstruir la historia de un gran avance científico. La época de las grandes personalidades individuales ha quedado atrás, sobre todo en las ciencias experimentales. Se trabaja en equipo, se va de congreso en congreso, se explotan las ideas de los demás, se combinan con las propias concepciones y se armoniza todo con las ideas de los coautores. De este modo, cuando se publica un tratado sólo contiene los resultados y

sólo, en raras ocasiones, puede enterarse el lector del proceso que condujo a estos resultados.

La historia del descubrimiento de las estrellas de rayos X llenaría por sí sola un libro si quisiéramos explicarla en todos sus detalles. De hecho, en la Universidad de Wisconsin, en EE.UU., Richard F. Hirsh está escribiendo su tesis sobre este tema. Mi intención es presentar únicamente unos cuantos hechos que condujeron a la fundación de la astronomía de rayos X, nombrando a algunas personas en representación de un gran número de físicos, astrónomos e ingenieros. Y debo citar también una empresa.

En los aeropuertos de casi todo el mundo el equipaje de los pasajeros se controla con complicados aparatos que emiten rayos X débiles. En Norteamérica suelen ser aparatos de la empresa AS & E, abreviatura de “American Science and Engineering”. Esta empresa fue fundada por Martin Annis en 1958, y la mayoría de su personal son científicos. La empresa trabajó durante los primeros años en armas nucleares, colaborando estrechamente con el MIT, el “Massachusetts Institute of Technology”, una de la más importantes escuelas superiores técnicas de EE.UU. Debemos a la empresa AS & E los primeros satélites de rayos X. Probablemente el hecho clave que permitió su fabricación tuvo lugar en septiembre de 1959, cuando un joven becado italiano en EE.UU. se entrevistó con un famoso compatriota.

Riccardo Giacconi había llegado en 1956 a América con una beca Fulbright. Era físico, y su especialidad, la medición de rayos cósmicos. Se había doctorado con este tema en Milán en 1954, y en EE.UU. trabajó en la Universidad de Indiana en Bloomington y luego en Princeton con temas semejantes. Impresionado por el alto nivel de la ciencia en EE.UU. y por los medios que en aquel momento, después de la conmoción del Sputnik, se dedicaban de modo prácticamente ilimitado a las ciencias espaciales, quiso quedarse en Estados Unidos. Un colega le habló de AS & E y él se entrevistó con Martin Annis, presidente, en aquel momento, de aquella empresa de investigación formada por 27 personas. Giacconi empezó a trabajar en septiembre de 1959 con AS & E. Poco después Annis le presentó a Bruno Rossi. El físico Rossi trabajaba en el MIT, había emigrado antes ya de la II Guerra Mundial a EE.UU., había trabajado con el gran Enrico Fermi que había construido en Chicago el primer reactor nuclear y que ahora, además de trabajar en el MIT, era jefe de un grupo asesor de la empresa de investigación AS & E. Giacconi escribió luego, recordando su primera entrevista con el famoso Rossi:

«Bruno Rossi, en una breve entrevista en su casa, me dijo que, aparte de otros proyectos espaciales, consideraba muy provechoso investigar el cielo en el dominio de los rayos X. No se sabía nada sobre el tema, pero él creía que la investigación de un campo totalmente nuevo podía tener éxito. Puse inmediatamente manos a la obra para descubrir lo que en aquel momento se sabía.» No era mucho. Herbert Friedmann había investigado los rayos X procedentes del Sol; no se había encontrado ninguna fuente más de rayos X.

Giacconi pensó en posibles receptores de rayos X y estudió, con otros, posibles técnicas para medir los rayos X cósmicos. En 1960, la NASA dio luz verde para un primer telescopio de rayos X. Giacconi había formado ya un pequeño grupo que trabajaba en AS & E con experimentos espaciales. En 1961, el grupo contaba con 70 personas. En 1962, volaron en 19 cohetes y en 7 satélites experimentos del grupo, entre ellos un receptor de rayos X. Pronto se descubrieron rayos X procedentes del espacio, no de nuestro vecino Sol, sino de las profundidades de la Vía Láctea, quizá de más lejos. En julio de 1962 se descubrió la primera fuente puntual en la constelación del Escorpión: ¡se había descubierto la primera estrella de rayos X! Giacconi escribe: «Animados por nuestros resultados, Friedmann y los científicos del Naval Research Laboratory consiguieron confirmar nuestros descubrimientos en abril de 1963. En septiembre de 1963 presenté a la NASA un plan para el futuro trabajo. Describí en él mi idea de un nuevo satélite de lenta rotación para un telescopio de 1,2 metros para observar los rayos X. Ya entonces quedó fijada la línea clara de mi investigación. Le correspondía ahora a la naturaleza que todo fuera productivo y excitante.»

El 12 de diciembre de 1970 se elevó de la costa de Kenia el satélite que Giacconi y su grupo habían construido para la NASA. Era el aniversario de la Independencia de aquel Estado, conseguida en 1963, y por ello el satélite recibió el nombre de *Uhuru*, que en suahili significa "Libertad" En la figura 10-1 vemos al Uhuru tal como lo representa en el espacio el dibujante de la NASA. Durante su vida activa el aparato ha descubierto más de cien fuentes puntuales en el cielo. El resultado ha proporcionado a Riccardo Giacconi y a sus colaboradores un gran prestigio en el mundo científico, y ha planteado muchos enigmas a los astrofísicos de oriente y de occidente. Todavía nos falta mucho para explicar los objetos descubiertos por Uhuru.

Lo primero que interesa a los astrónomos cuando se descubren nuevos objetos es saber si se trata de astros próximos o lejanos. En

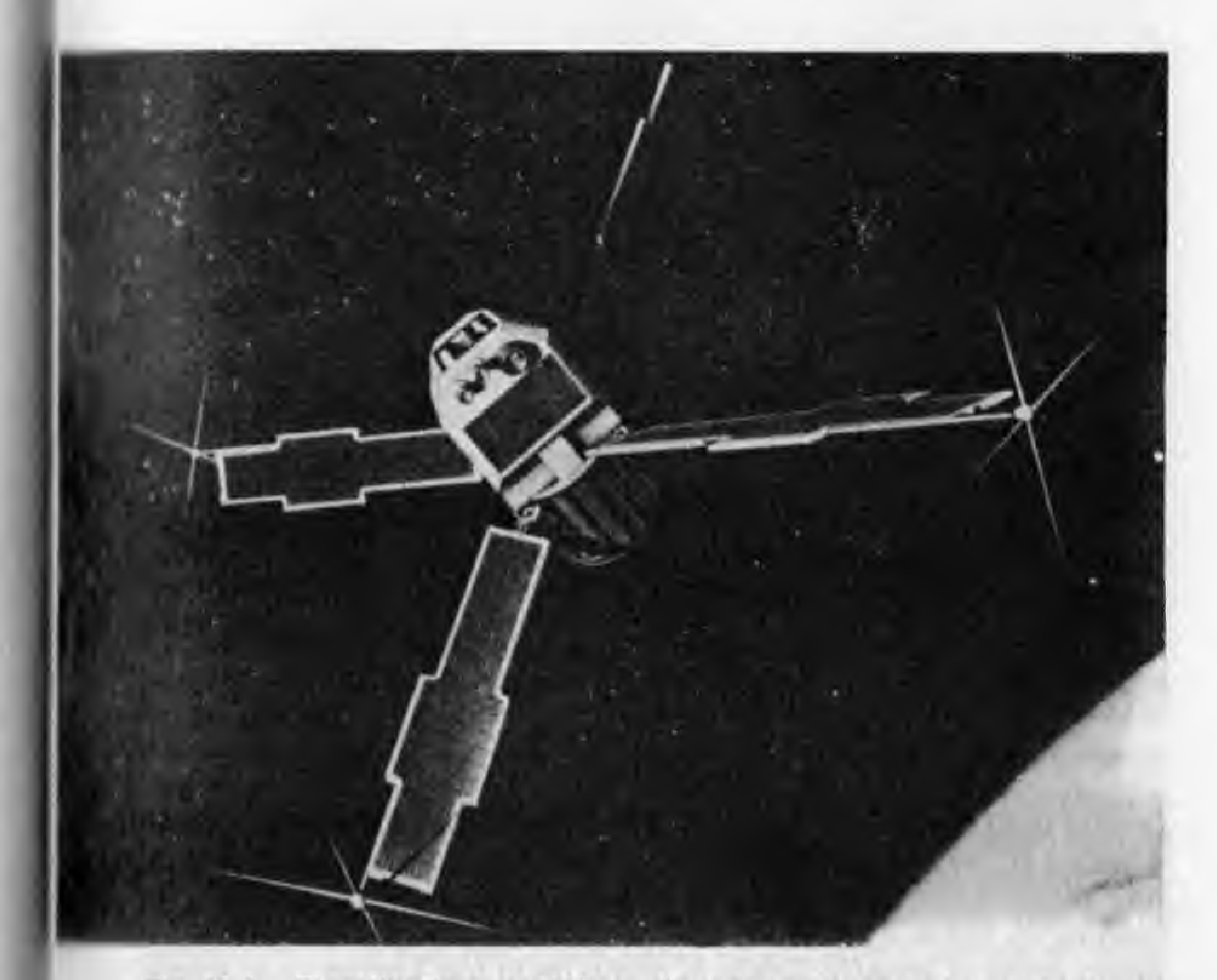


Fig. 10-1. El satélite de rayos X Uhuru dibujado en el espacio. Los cuatro "paneles solares" proporcionan energía solar a los aparatos. Los receptores de rayos X del cuerpo principal del satélite exploran el cielo por bandas mientras éste gira alrededor de su eje cada diez minutos. Los resultados de las mediciones se envían por radio a la Tierra.

la mayoría de los casos es muy difícil determinar la distancia a los astros, pero a veces bastan datos aproximados: saber, por ejemplo, si estos objetos están situados o no en nuestra galaxia. Hemos visto ya cómo puede responderse a esta pregunta en el caso de los pulsares. Se comprueba si están distribuidos en el cielo del mismo modo que las estrellas de nuestra galaxia. La figura 10-2 muestra el resultado de este test aplicado a las fuentes que descubrió Uhuru. Las fuentes están representadas en una red de coordenadas angulares cuya línea recta central es el plano de simetría de la Vía Láctea. Basta una

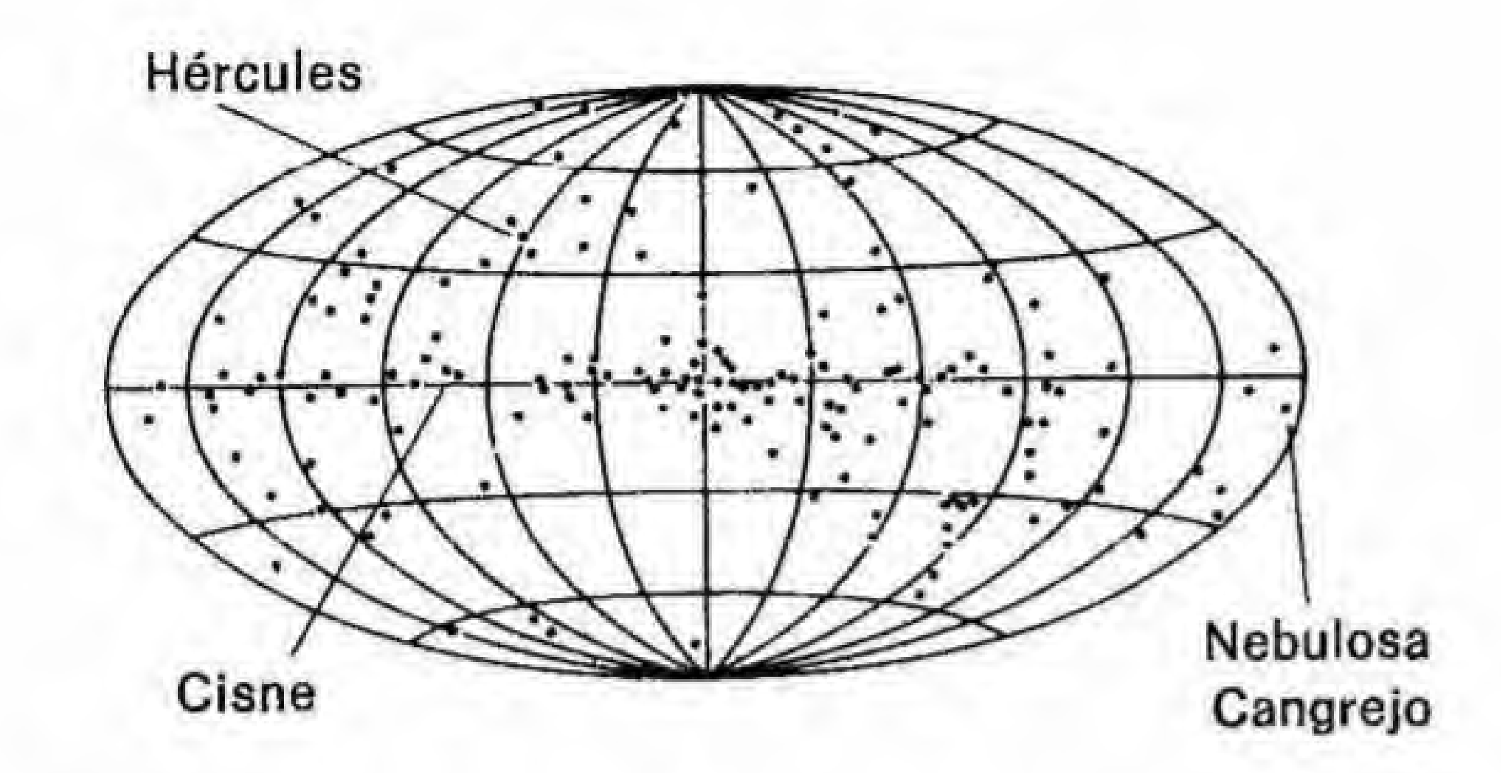


Fig. 10-2. Distribución en el cielo de las fuentes de rayos X descubiertas por Uhuru. La red de coordenadas angulares, como la de la figura 8-4, se ha escogido de modo que la esfera celeste quede representada sobre una superficie ovalada. La Vía Láctea se extiende a lo largo de la recta central. En el centro del óvalo miramos exactamente hacia el centro del disco de la Vía Láctea. La mayoría de fuentes de rayos X están situadas en el cielo cerca de la Vía Láctea, especialmente en las proximidades de su centro. Se han señalado algunas fuentes citadas en el texto.

ojeada para comprobar que la mayoría de fuentes de rayos X están situadas en las proximidades de la Vía Láctea. En los lugares donde hay muchas estrellas, hay un número relativamente elevado de fuentes de rayos X. Pero también se observan algunas fuentes mirando hacia el espacio desde el plano de la Vía Láctea: la mayoría están situadas en los lugares donde se acumulan las galaxias lejanas.

En lo que sigue voy a limitarme únicamente a las fuentes de nuestro propio sistema galáctico. Sabemos la distancia aproximada que nos separa de ellas. En promedio están tan alejadas de nosotros como la mayoría de estrellas de nuestra galaxia, y por tanto su distancia es de unos millares de años luz. Si medimos la radiación que recibimos de ellas, podemos evaluar la integridad real de estos objetos. Emiten en el dominio de los rayos X con una intensidad mil veces superior a la emisión de nuestro Sol en todas las longitudes de onda.

LA ESTRELLA DE RAYOS X EN HÉRCULES

Consideremos en primer lugar una fuente que descubrió Uhuru en la constelación de Hércules, y que recibe el nombre de Hér-

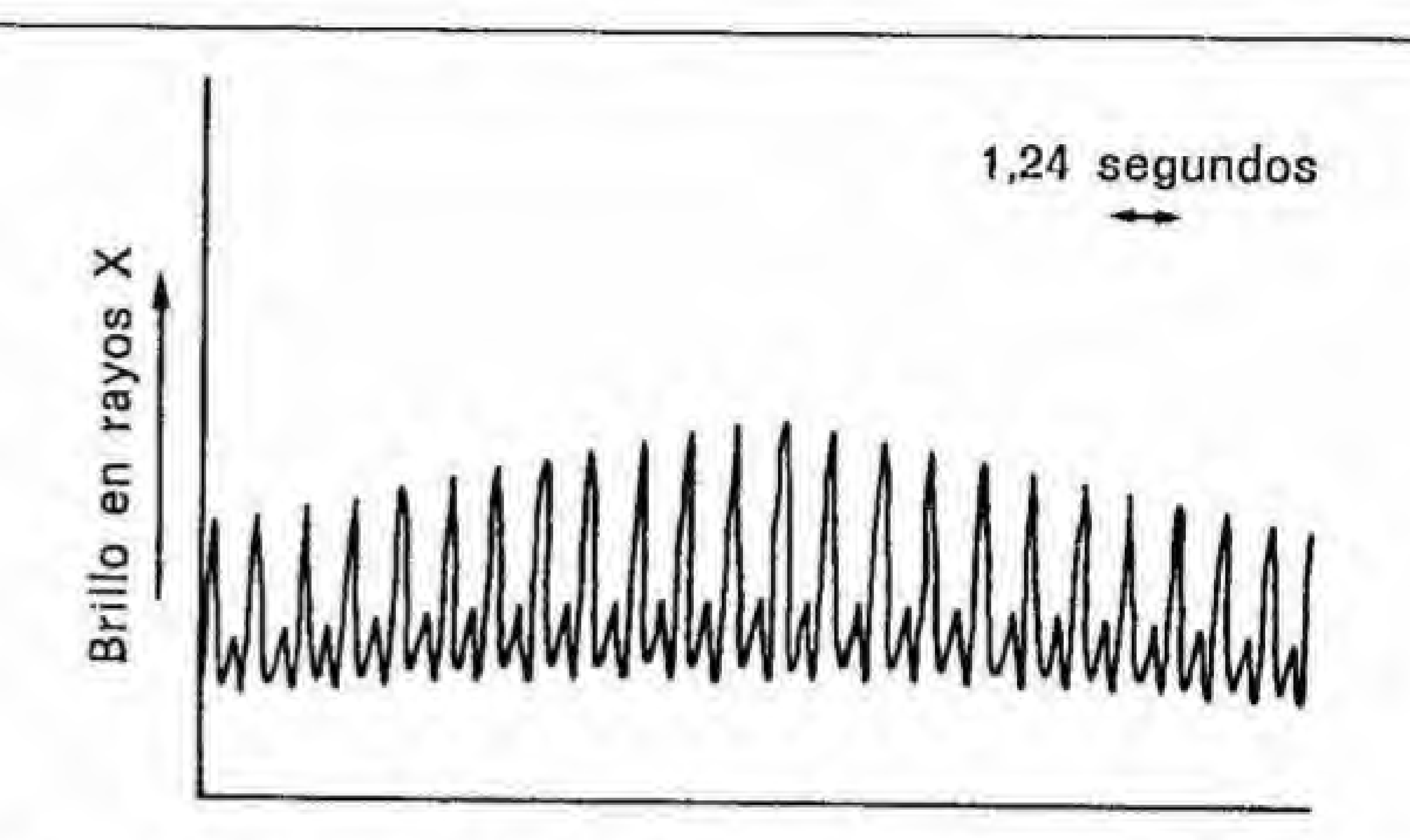


Fig. 10-3. Destellos de rayos X de la fuente que Uhuru descubrió en Hércules.

cules X-1. La radiación que capta el satélite no le llega uniformemente, sino en forma de destellos de rayos X, que se suceden cada 1,24 segundos, y que vemos representados en la figura 10-3.

Sin embargo, el intervalo temporal entre dos impulsos de rayos X no se mantiene de modo estricto. A veces el ritmo baja brevemente, para aumentar luego, repitiéndose todo el proceso con un período de 1,70017 días. El fenómeno, representado esquemáticamente en la figura 10-4, parece indicar que la fuente de rayos X en ocasiones se mueve hacia nosotros y en ocasiones se aleja de nosotros, como sucedería si girara alrededor de otro astro. Imaginemos una estrella central, alrededor de la cual gira una fuente de rayos X en una órbita circular con un período de un día. Supongamos que la fuente en sí emite destellos de rayos X a intervalos de un



Fig. 10-4. Representación esquemática de la contracción y dilatación de los impulsos de Hércules X-1, con un período de 1,7 días. Este fenómeno reveló la estructura doble de la fuente.

segundo. La figura 10-5 representa los impulsos sucesivos que el observador capta a intervalos más largos y más cortos, como sucede exactamente con la fuente de rayos X de Hércules. Deducimos de ello que la fuente gira alrededor de otra estrella con un período de 1,70017 días.

Ahora el lector ya conoce la continuación: cuando dos estrellas giran a poca distancia, una alrededor de la otra, pueden ocultarse ocasionalmente vistas desde nuestro punto de observación. Tenemos entonces variables de ocultación como Algol o Zeta Aurigae. Si nuestra fuente de rayos X gira alrededor de otra estrella, es posible que en cada rotación, o sea, cada 1,70017 días, desaparezca detrás de la estrella, cesando las señales de rayos X.

Esto es exactamente lo que se ha descubierto en Hércules X. La figura 10-6 muestra las observaciones de Uhuru correspondientes a enero de 1972: cada 1,70017 días cesan los impulsos durante unas cinco horas, la fuente ha quedado oculta por la otra estrella.

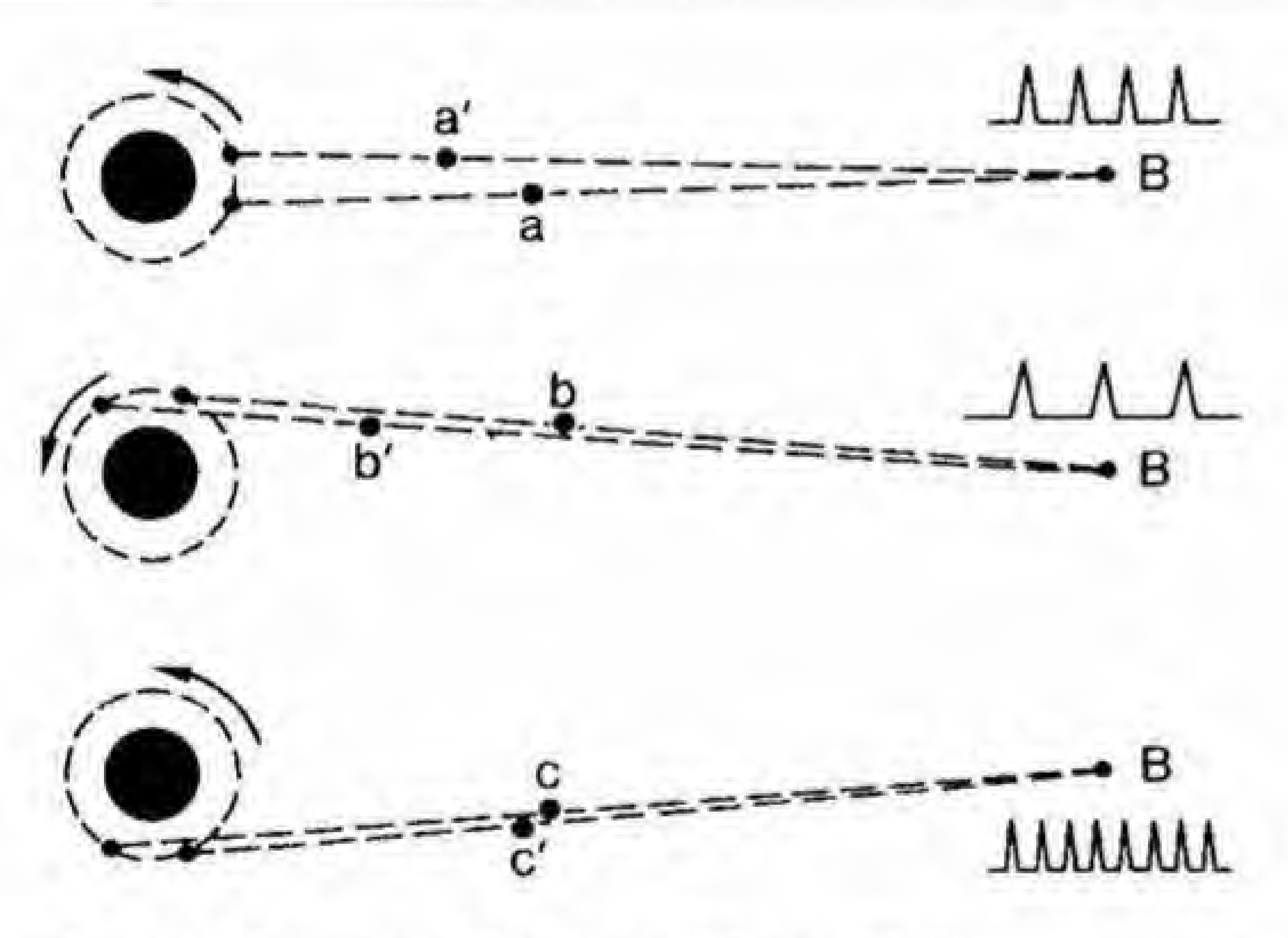


Fig. 10-5. Una fuente de rayos X que podría emitir impulsos separados por un segundo gira en una órbita circular alrededor de una estrella representada en la figura como un disco. Un observador B situado a gran distancia del astro mide los intervalos entre dos destellos sucesivos. *Arriba:* Dos destellos *a y a'*, en camino hacia el observador. Cuando la fuente emitió *a'* estaba en un punto de su órbita distinto al de la emisión de *a*. En el caso aquí representado los trayectos de ambos destellos son de igual longitud. El observador los capta con una separación de un segundo. *Centro:* Los destellos *b* y *b'* emitidos cada segundo han de recorrer ahora trayectos de distinta longitud. El destello *b'* emitido en segundo lugar ha de cubrir una distancia más larga. El observador recibe ambos destellos con un intervalo de separación superior a un segundo. *Abajo:* El destello *c'* emitido en segundo lugar recorre el trayecto menor; el observador capta los destellos más juntos.

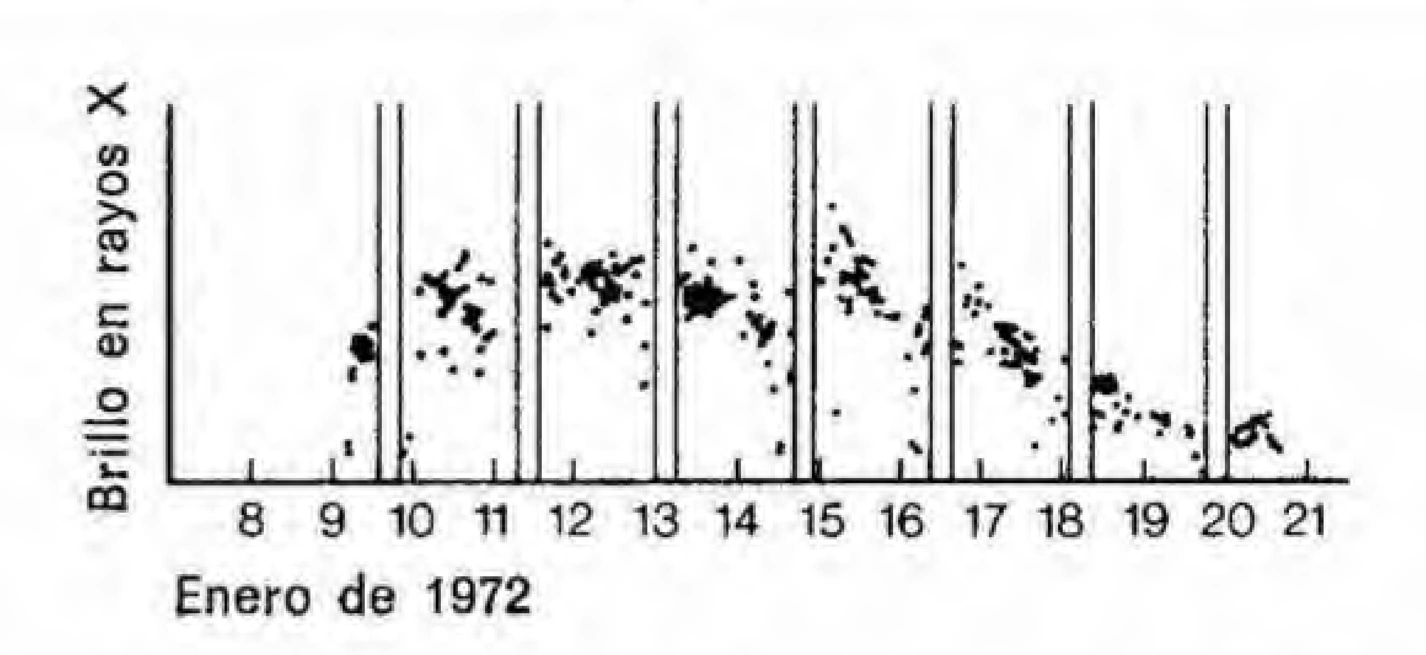


Fig. 10-6. Comportamiento de la fuente Hércules X-1 en un intervalo prolongado de tiempo. Los puntos indican la intensidad de los destellos de rayos X medidos por Uhuru. Las líneas dobles verticales están dibujadas a intervalos de 1,70017 días. Indican el intervalo de cinco horas durante el cual desaparecen los destellos al ocultarse la fuente detrás del astro alrededor del cual está girando. Los impulsos empezaron a captarse el 9 de enero y después del 21 desaparecieron. La desaparición responde al ciclo de treinta y cinco días de la fuente de Hércules explicado en el texto.

Pero las cosas son todavía más complicadas. La fuente de rayos X no siempre emite. Está "conectada" durante unos doce días, en los que emite impulsos de 1,24 segundos interrumpidos por las correspondientes ocultaciones. Luego los rayos X cesan de nuevo durante veintitrés días, al cabo de los cuales la fuente reemprende su actividad.

LA FUENTE DE HÉRCULES SE HACE VISIBLE

¿Qué objeto hay en la región de Hércules de donde nos llegan los impulsos de rayos X? Uhuru sólo podía determinar de modo aproximado la posición de la fuente. Como muestra la figura 10-7, en esta región hay muchas estrellas. ¿Destaca alguna de ellas por alguna característica especial? El astrónomo norteamericano William Liller fue el primero en señalar una estrella que figura desde 1936 en el catálogo de las variables.

Nos encontramos ahora de nuevo con aquel joven empresario que Hartwig dejó trabajar en el observatorio de Bamberg durante la Primera Guerra Mundial. Cuno Hoffmeister reconoció, en el año

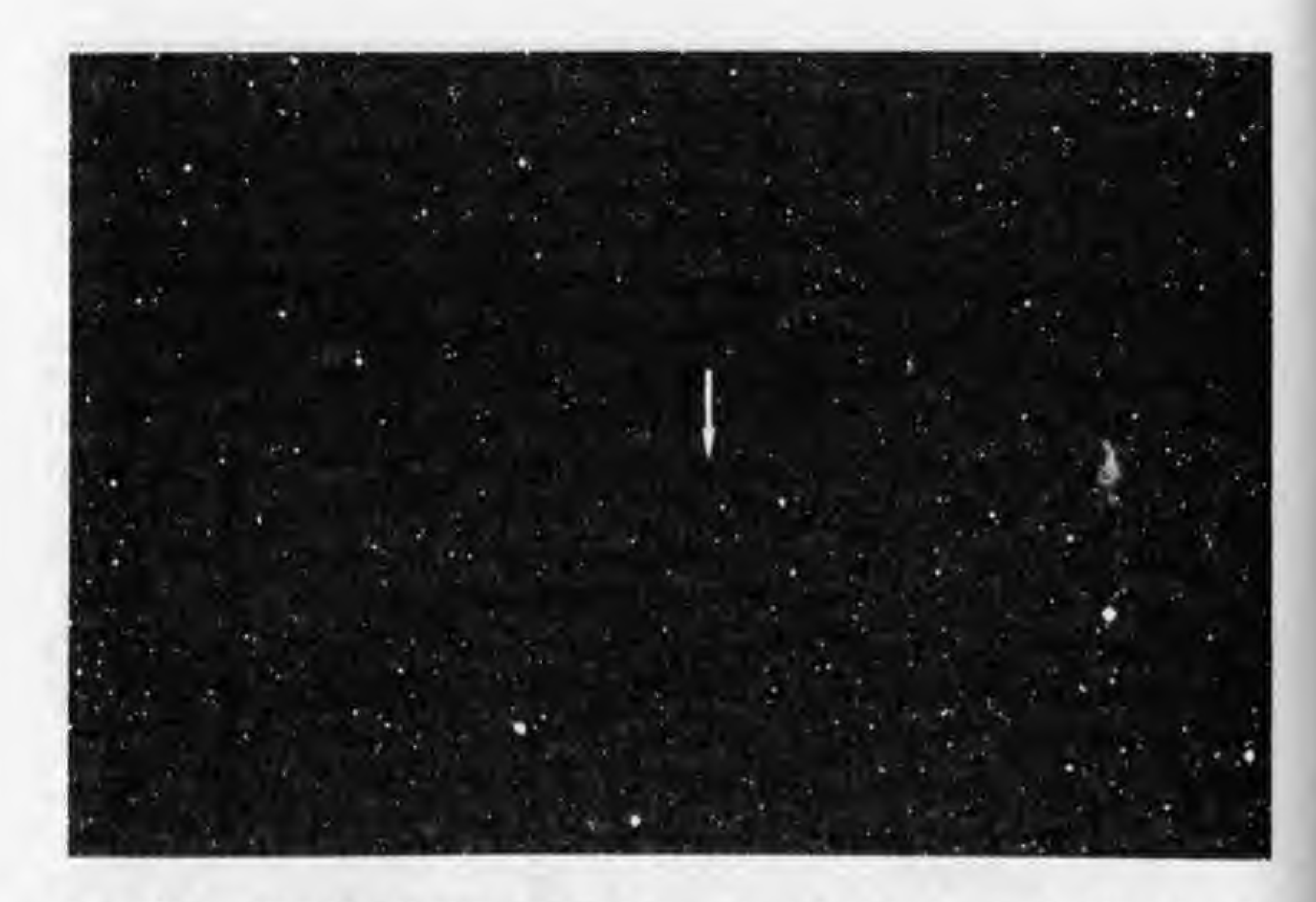


Fig. 10-7. Región del cielo donde Uhuru descubrió la fuente de Hércules. La débil estrella variable de Hoffmeister está señalada con una flecha.

1936, en unas fotografías del cielo que una estrella de Hércules era variable. Hoffmeister se había doctorado desde hacía tiempo, disponía de un observatorio propio financiado en parte privadamente y buscaba de modo sistemático estrellas variables en el cielo. En el curso de su vida descubrió muchos millares. La estrella de Hércules no pareció distinguirse por nada. Hoffmeister no pudo determinar si las variaciones de intensidad seguían alguna regla simple, por ejemplo si eran periódicas. Cuando la observó más tarde, en el transcurso de algunas noches, le pareció que la luminosidad de la estrella ya no variaba más. Desde 1936, el objeto de Hoffmeister figuró en los catálogos como la estrella HZ Herculis, sin que nadie se ocupara de ella. Ahora su proximidad a la fuente de rayos X recién descubierta la convertía de nuevo en un objeto interesante. La fuente de rayos X tenía un período de rotación de 1,70017 días y lo lógico era preguntarse si la estrella de Hoffmeister presentaba el mismo ritmo de variación. En el verano de 1972, John y Neta Bahcall descubrieron con mediciones realizadas en el observatorio de Tel Aviv que la

estrella de Hoffmeister presentaba realmente fluctuaciones de luminosidad con este período exacto.

La estrella visible y la fuente de rayos X tenían, pues, alguna relación. La estrella brilla menos cuando se interrumpen los impulsos de rayos X, es decir, cuando la fuente se oculta tras ella. Brilla más cuando la fuente, vista desde nuestra dirección, pasa delante suyo (véase fig. 10-8). Ahora ya podía comprenderse el cambio de luz. Cuando la estrella visible está detrás de la fuente de rayos X, la cara dirigida hacia nosotros se calienta con los intensos rayos X que recibe, y nos parece más brillante. Cuando la fuente está detrás suyo, calienta la cara opuesta, invisible para nosotros. Si dejamos de lado este efecto de calentamiento, la estrella es una estrella normal de la secuencia principal con dos masas solares.

¿Por qué Hoffmeister, un experto observador, pensó más tarde que su estrella era invariable? En antiguas fotografías astronómicas de los archivos podía verse que la estrella interrumpe a veces durante años sus cambios lumínicos. ¿Ya no la irradia entonces la fuente de rayos X? ¿Deja también de emitir Hércules X-1 durante estos perío-

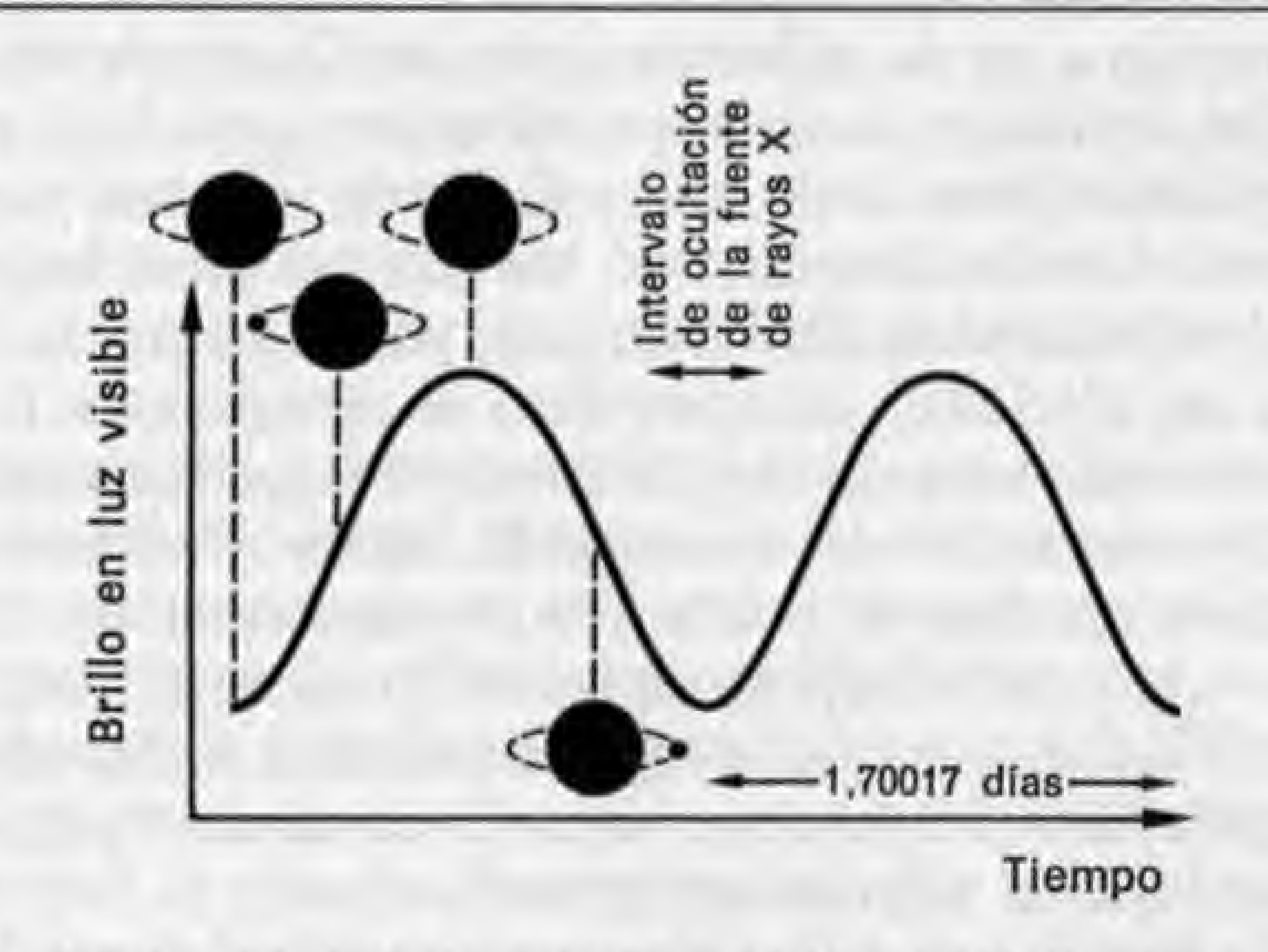


Fig. 10-8. La luminosidad de la estrella variable de Hoffmeister, HZ Herculis, aumenta y disminuye regularmente (curva). En la mitad izquierda del dibujo, cuatro esquemas representan arriba y abajo de la curva las respectivas posiciones de la estrella (disco) y de la fuente de rayos X (punto), en relación al observador. Cuando la fuente de rayos X está situada delante de la estrella —desde nuestro punto de vista— vemos la cara calentada por la fuente y la estrella nos parece más brillante. Cuando la fuente está situada detrás de la estrella, sólo vemos la cara "normal" no calentada; la estrella nos parece débil.

dos? Desde que Uhuru descubrió la fuente, HZ Herculis cambia de brillo uniformemente siguiendo el ritmo del período de rotación. Pero no puede durar mucho hasta que vuelva a brillar durante años con luz constante. Entonces veremos cómo se comporta la fuente de rayos X.

Entre mayo de 1983 y marzo de 1984, la fuente de rayos X de Hércules X-1 apenas pudo captarse. Sin embargo, el brillo de la estrella HZ Herculis de Hoffmeister continuó oscilando. Esto apoya la idea de que la fuente de rayos X continuó activa todo el tiempo, al igual que la estrella de Hoffmeister continuaba brillando, pero que los rayos X que emitía no nos alcanzaban.

LAS ESTRELLAS DE RAYOS X SON PEQUEÑAS

Se comporta de modo muy distinto una fuente en la constelación del Cisne, Cygnus X-1, que no presenta impulsos regulares, sino fluctuaciones irregulares y muy rápidas de intensidad. Además, su intensidad varía a lo largo de los meses. En la misma región del cielo hay una radiofuente variable. Sus fluctuaciones siguen un curso muy parecido a las de la fuente de rayos X: cuando ésta aumenta de intensidad, lo mismo hace la radiofuente; cuando la radiofuente reposa, también reposa la de rayos X. Ha de tratarse, por tanto, del mismo objeto. Los astrónomos en los últimos años han elaborado métodos para determinar de modo muy parecido la posición de una radiofuente en el cielo; gracias a esto la posición de la fuente de rayos X se ha determinado con tal precisión que ha podido identificarse inequívocamente con una estrella visible. También esta estrella pertenece a un sistema doble. No pueden verse las dos estrellas —sólo una—, pero el efecto Doppler de su espectro (véase Apéndice A) permite reconocer que la estrella gira en 5,6 días alrededor del centro de gravedad del sistema, junto con una acompañante, y ésta es probablemente la estrella de rayos X.

Algunas fuentes de rayos X han aparecido durante breve tiempo para desaparecer a continuación. Centaurus X-4 emitió muy poco tiempo. La fuente emitía 6,7 impulsos por minuto, pero desapareció de nuevo al cabo de unos días.

¿Cómo se integran las fuentes de rayos X en nuestro cuadro de los procesos cósmicos? Se trata evidentemente de astros. Pero, ¿cómo puede emitir una estrella rayos X? La temperatura superficial de las estrellas más calientes que conocemos hasta el momento es

demasiado baja para generar rayos X. Los rayos X de las envolturas enrarecidas y calientes que muchas estrellas poseen son, como los de la corona solar, demasiado débiles.

Los impulsos de rayos X son muy breves. La radiación de Hércules X-1 sube hasta su máximo en menos de un cuarto de segundo. Las fluctuaciones irregulares de Cygnus X-1 se producen a intervalos menores de una centésima de segundo.

Vimos con los pulsares que la velocidad de las fluctuaciones del brillo permitía limitar el tamaño del volumen que emite la radiación. Esto es válido, tanto para la radiación lumínica como para las ondas de radio, y es válido también para los rayos X de las fuentes descubiertas por Uhuru.

Si en Cygnus X-1 observamos fluctuaciones menores de una centésima de segundo, el espacio que emite los rayos X no puede ser de tamaño muy superior al trayecto que cubre la luz en unas centésimas de segundo. Esta distancia es inferior a 10.000 kilómetros, inferior a una centésima parte del radio solar. Por tanto, estos cuerpos que emiten con una intensidad mil veces superior a la del Sol tienen que ser muy pequeños. Apoya también esta idea la rápida ocultación de la fuente de Hércules, que desaparece abruptamente sin transición detrás de la estrella.

Puesto que las fuentes de rayos X son objetos pequeños, es lógico preguntarse si tienen algo que ver con ellas las enanas blancas o las estrellas de neutrones. Esto nos permitirá entender al mismo tiempo el origen de los rayos X. Hemos visto al principio que se necesitan temperaturas de millones de grados para generarlos. Cuando cae materia sobre una enana blanca o sobre una estrella de neutrones, la velocidad del choque con la superficie estelar, debida a la elevada gravedad, es tan alta que su frenado podría crear fácilmente temperaturas de millones de grados. Ésta sería una explicación perfectamente natural del origen de los rayos X. Pero, ¿de dónde procede la materia que llueve a gran velocidad sobre la enana blanca o sobre la estrella de neutrones? ¿Se explica su presencia porque la mayoría de estrellas de rayos X, o quizá todas, pertenecen a sistemas dobles? Cuando una estrella normal y una enana blanca o una estrella de neutrones giran una alrededor de otra, y la estrella normal, como, por ejemplo, el Sol y otras estrellas, proyecta materia al espacio, una porción de la materia proyectada es captada por la gravedad de la estrella acompañante; esta materia se precipitará sobre su superficie y al caer se calentará tanto que se emitirán rayos X (véase fig. 10-9).

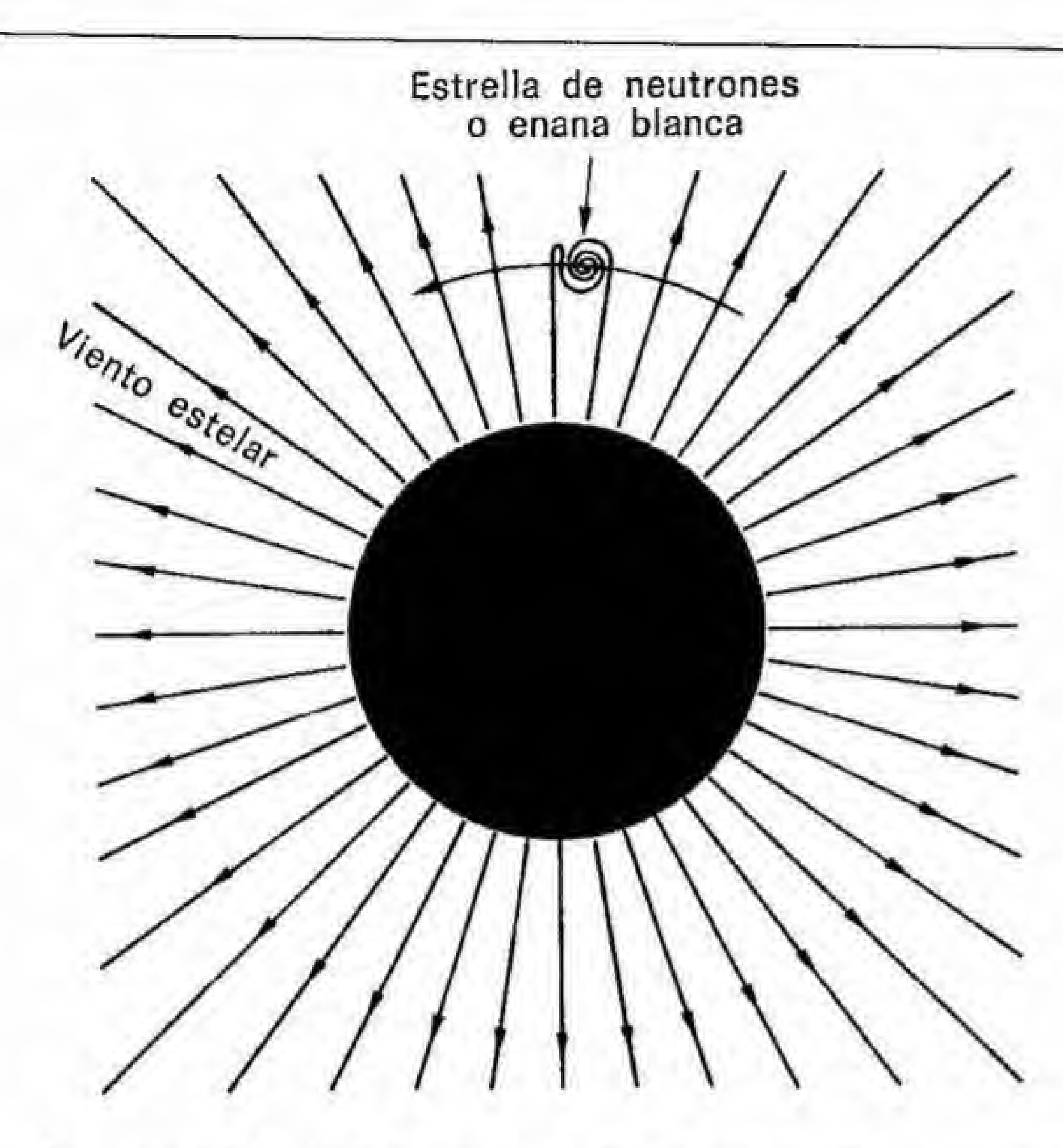


Fig. 10-9. Una posible causa de la emisión de rayos X en un sistema estelar doble. Una estrella (en el centro del dibujo) proyecta viento estelar al espacio. Las líneas con flecha que parten de la estrella principal indican la dirección del flujo. Una estrella de neutrones o enana blanca que gira alrededor de la estrella principal, recoge una parte de las masas gaseosas que fluyen por el espacio y las obliga a precipitarse con mayor velocidad sobre su superficie. Al chocar el gas contra la superficie, la materia se calienta hasta emitir rayos X.

LA HISTORIA DE UNA FUENTE DE RAYOS X

Podemos ahora hacernos una idea aproximada de una fuente de rayos X. Su historia podría ser la siguiente: dos estrellas de masa distinta giran desde hace tiempo una alrededor de la otra (véase figura 10-10). La estrella de mayor masa agota primero su reserva de hidrógeno y se dispone a convertirse en gigante roja. Después de evacuar materia al espacio o de entregar masa a su acompañante (a) se convierte en enana blanca (b). Tenemos ahora un par estelar formado por una estrella de la secuencia principal y por una enana blanca. Si la estrella de la secuencia principal agota también su hidrógeno y se hincha para convertirse en una gigante roja, puede

superar su volumen máximo permitido y ceder masa a su compacta acompañante. La materia se precipita sobre el cuerpo más compacto y se generan rayos X. Basta para esto que llueva por año sobre una enana blanca una cienmillonésima parte de la masa del Sol. También es imaginable que la enana blanca capte viento solar escapado de la superficie de la estrella normal, con la consiguiente producción de rayos X (c).

Esto recuerda la historia de la compañera de Mira. Hemos dis-

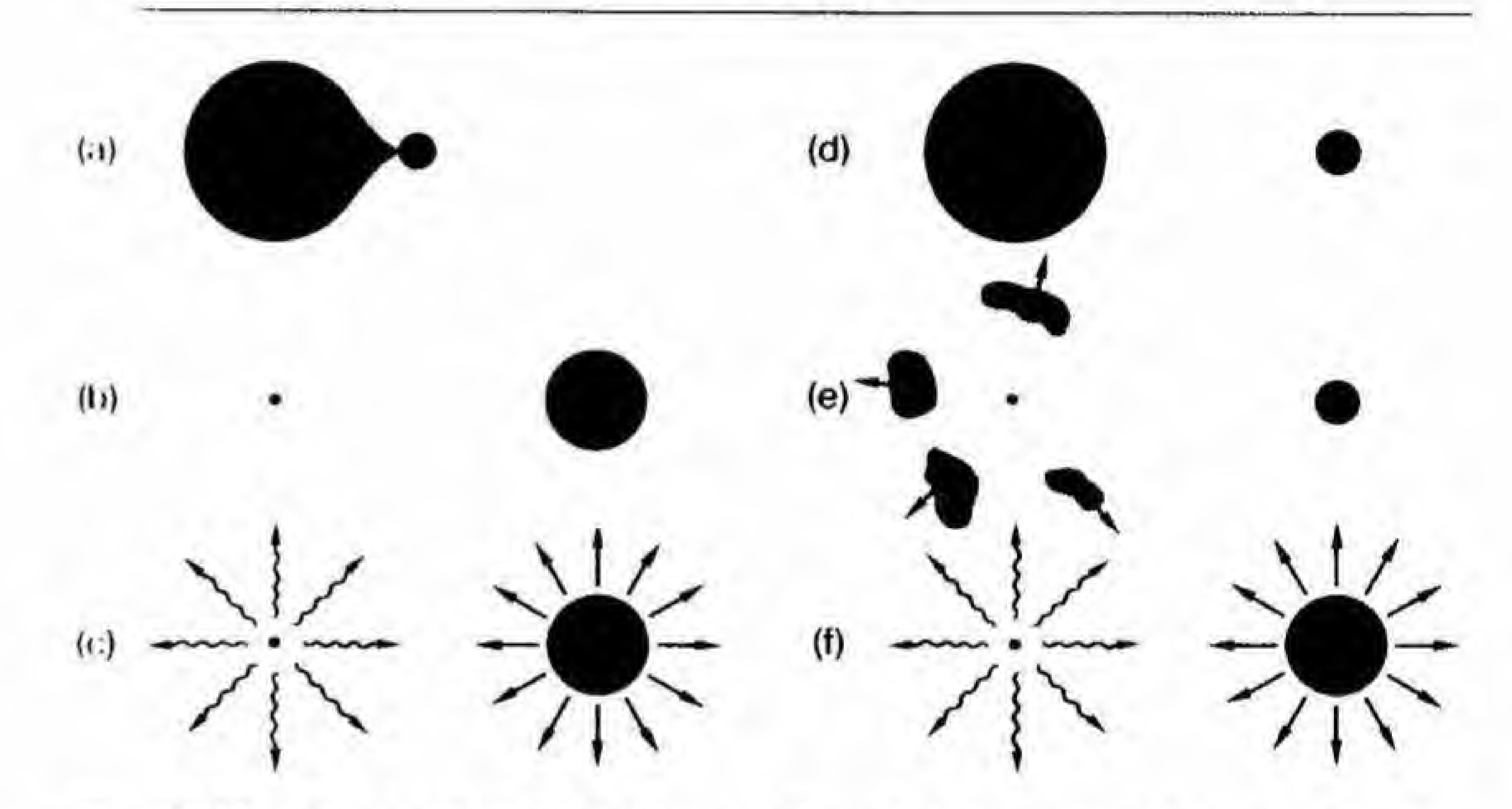


Fig. 10-10. Dos posibles historias evolutivas de sistemas estelares que pueden producir una fuente de rayos X. *Izquierda:* dos estrellas de la secuencia principal y de masas distintas giran una alrededor de la otra a poca distancia. La de mayor masa presenta primero los síntomas de agotamiento, y podría convertirse en una gigante roja. Pero sus capas exteriores se introducen en el dominio gravitatorio de la acompañante, y ésta le absorbe tanta masa (a), que sólo le queda el núcleo en forma de enana blanca, tal como está representada en (b) de la figura 9-6. Si la estrella de la derecha que se ha convertido ahora en la de mayor masa genera en el curso de su evolución un viento estelar, una parte del gas proyectado cae sobre la enana blanca que puede emitir rayos X (flechas onduladas), como indica la figura 10-9. *Derecha:* (d) Dos estrellas de masa distinta giran una alrededor de la otra. La de mayor masa evoluciona con mayor rapidez y estalla en forma de supernova. (e) La envoltura de la estrella de mayor masa vuela por el espacio; queda en el centro una estrella de neutrones que gira junto a la otra estrella, la cual continúa en la secuencia principal. (f) La estrella del sistema doble perteneciente a la secuencia principal evoluciona. Fluye gas al espacio en forma de viento estelar. Una parte de este gas se precipita sobre la estrella de neutrones como indica la figura 10-9 y genera rayos X (flechas onduladas).

cutido ya este caso. La enana blanca que gira alrededor de Mira va acumulando materia. ¿Por qué no emite rayos X? Quizá porque está demasiado lejos de Mira y sólo puede recoger una pequeña cantidad del gas que escapa de Mira; lo suficiente para brillar en luz visible, pero demasiado poco para aparecer en forma de estrella de rayos X.

Pero también es posible que las enanas blancas no jueguen ningún papel en las estrellas de rayos X. Es muy imaginable que en un sistema estelar doble una estrella componente haya explotado en forma de supernova (véase fig. 10-10 [d, e]) y que haya quedado un resto en forma de estrella de neutrones, como la de la nebulosa Cangrejo. La estrella de neutrones gira alrededor de su estrella acompañante, que ha resistido relativamente incólume la explosión de su vecina. Si esta estrella entrega materia a la estrella de neutrones en forma de viento estelar, o porque al evolucionar ha superado su volumen máximo, el gas caerá sobre la superficie con una energía todavía superior a la de la materia de la enana blanca; los rayos X son ahora más intensos todavía (f).

¿Qué es responsable de la emisión de rayos X, una enana blanca o una estrella de neutrones? Pronto conoceremos los motivos que hoy en día inclinan a los astrofísicos en favor de la estrella de neutrones.

¿DE DÓNDE PROCEDEN LOS IMPULSOS?

Consideramos lógico, ya, que en las fuentes se originen rayos X. Pero todavía no hemos explicado por qué nos llegan en forma de impulsos.

En el caso de los pulsares creemos que el ritmo de los impulsos se debe al movimiento de rotación de la estrella de neutrones. Nuestro astro compacto, como la mayoría de cuerpos celestes, tendrá también un campo magnético, y al igual que en el caso terrestre el eje magnético no se corresponderá con el de rotación. La materia cósmica atraviesa con dificultad las líneas de campo magnético. Por tanto, la materia del sistema estelar doble caerá sobre el objeto compacto únicamente a través de sus polos magnéticos, tal como muestra la figura 10-11. Los rayos X sólo se generan en los puntos donde cae materia, es decir, en las proximidades del polo magnético, y sólo pueden escapar lateralmente, porque la dirección de los ejes magnéticos son absorbidos por la materia que cae sobre ellos. Al girar el

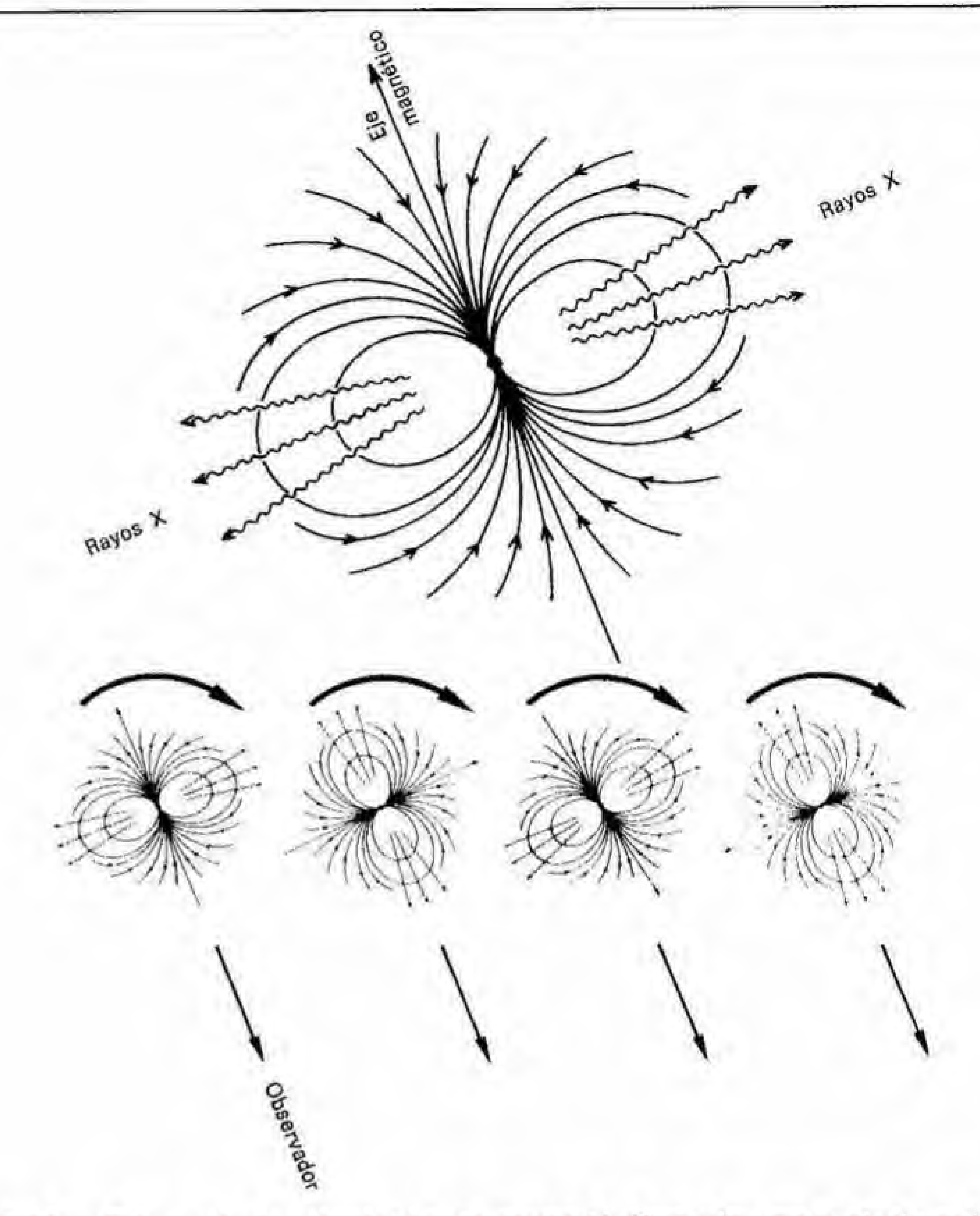


Fig. 10-11. Origen de los destellos de rayos X. Cuando cae materia sobre una estrella compacta, el choque genera rayos X (parte superior de la figura). Si la estrella posee un campo magnético de forma semejante al campo terrestre, es decir, cuyas líneas de campo tienen la forma de las líneas ovaladas trazadas en la figura, el gas sólo puede precipitarse sobre la estrella compacta, representada por una bolita, siguiendo las líneas de campo que apuntan en la dirección de las flechas a los dos polos. La materia que cae en las proximidades del eje magnético forma dos "tapones" opacos a los rayos X. Por tanto, la radiación generada sólo puede escapar al espacio lateralmente (flechas onduladas). Si gira todo el astro, puede suceder que un observador lejano sólo capte los rayos X durante un breve momento, dos veces en cada período de rotación. El proceso está representado en la mitad inferior de la figura. El observador situado a gran distancia, debajo a la derecha, sólo recibe los rayos X en las posiciones segunda y cuarta del astro que gira en la dirección de la flecha grande. (Para simplificar hemos supuesto aquí que el eje magnético y el de rotación son perpendiculares entre sí.)

astro compacto, los rayos X que capta un observador alejado desaparecen cuando mira hacia ambos polos magnéticos. En los períodos intermedios los rayos X reaparecen, como muestra la figura 10-11.

MEDICIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO DE UNA ESTRELLA DE NEUTRONES

En el caso de los pulsares habíamos supuesto que los campos magnéticos explicaban sus impulsos de radio. También debemos recurrir a ellos en el caso de las estrellas de rayos X. ¿De dónde provienen los campos magnéticos de las estrellas de neutrones?

Los campos magnéticos están presentes en casi todas las regiones del Universo. El Sol presenta un campo magnético extenso, como el campo magnético de la Tierra, pero de intensidad doble. En las manchas solares los campos son mil veces más intensos. También otras estrellas manifiestan la existencia de campos magnéticos. Podemos pues suponer con alguna certeza que muchas estrellas poseen campos magnéticos.

Los campos magnéticos y la materia cósmica permanecen siempre unidos. Cuando aumenta la densidad de un astro, su campo magnético se hace más denso y más intenso. Cuando se forma una enana blanca, el gran aumento de densidad multiplica por diez mil la intensidad del débil campo magnético inicial. Se ha podido demostrar de modo concreto la existencia de campos magnéticos tan intensos en las enanas blancas. Pero cuando la materia estelar se condensa, alcanzando la densidad de una estrella de neutrones, los campos magnéticos también se condensan, pudiendo alcanzar intensidades cien mil millones de veces superiores. Esto es lo que hace esperar la existencia de campos magnéticos tan intensos en las estrellas de neutrones. ¡Y estos campos se han descubierto!

El 2 de mayo de 1976, se elevó de Palestine, en EE.UU., un globo con una carga de instrumentos científicos de medición desarrollados por el Instituto Max Planck de física extraterrestre de Garching, cerca de Munich, y por un equipo de la Universidad de Tubinga.

El grupo, dirigido por Joachim Trümper, tenía desde hacía un tiempo experiencia con los rayos X, y ahora, entre otros cometidos, se quería verificar el funcionamiento de un nuevo detector. El receptor podía captar rayos X de energía superior a la de los rayos

que captaban los detectores a bordo de Uhuru. Como sucede con la luz, la energía de un cuanto de rayos X aumenta cuando disminuye la longitud de onda. La energía de los cuantos de rayos X se suele medir en kiloelectronvoltios (keV). Los receptores del Uhuru "veían" en el intervalo de 2 a 10 keV. Los nuevos receptores podían captar rayos cuyos cuantos tenían más de 30 keV de energía. En aquel vuelo de la primavera de 1976 se observó la fuente Hércules X-1. Se quería investigar la intensidad de la radiación de alta energía.

Cuanto más refinada es la técnica, menor es el contacto directo que el observador tiene con sus datos. Hoffmeister podía todavía en 1936 mirar a través de su telescopio, evaluar el brillo de HZ Herculis y basándose en sus notas determinar inmediatamente si el brillo de la estrella había aumentado o no desde la última observación. Hoy en día los resultados de una medición se pasan al computador registrados en cinta magnética, y hay que desarrollar programas para leer las cintas y elaborar los datos. No es, pues, de extrañar que los resultados de la medición de mayo no estuvieran disponibles hasta el otoño. Se comprobó entonces que la radiación, que se debilitaba progresivamente hacia las altas energías, presentaba hacia los 58 keV un notable pico (véase fig. 10-12). Probablemente nadie se hubiera ocupado de este hecho si Trümper no hubiese recordado trabajos anteriores en los que había intentado explicar la radiación del pulsar del Cangrejo. Trümper se dispuso a investigar el hecho.

El pico en la emisión de rayos X de Hércules X-1 significa que la fuente emite muchos cuantos con una energía de 58 keV. Sabemos que los átomos tienen tendencia a emitir y captar energía en longitudes de onda muy determinadas, es decir, a captar y emitir energías muy determinadas. Tomemos, por ejemplo, el átomo de hidrógeno. Un electrón gira alrededor del núcleo cargado positivamente (véase fig. 10-13). Según la física cuántica, el electrón sólo puede moverse en órbitas muy determinadas y calculables. Cuando cae luz sobre el átomo, en general no pasa nada, a no ser que el cuanto de luz tenga la energía exacta necesaria para elevar un electrón de una órbita interior a otra exterior. Entonces el átomo absorbe este cuanto de luz. Si dejamos tranquilo al átomo, al cabo de un tiempo el electrón salta de nuevo a la órbita interior y emite la energía sobrante en forma de un cuanto de luz. Estos cuantos tienen una energía muy concreta, correspondiente a las energías que se liberan al pasar los electrones de una órbita a otra.

La fuente de Hércules emite claramente una cantidad mayor de radiación con una energía muy determinada, la de 58 keV. Pero

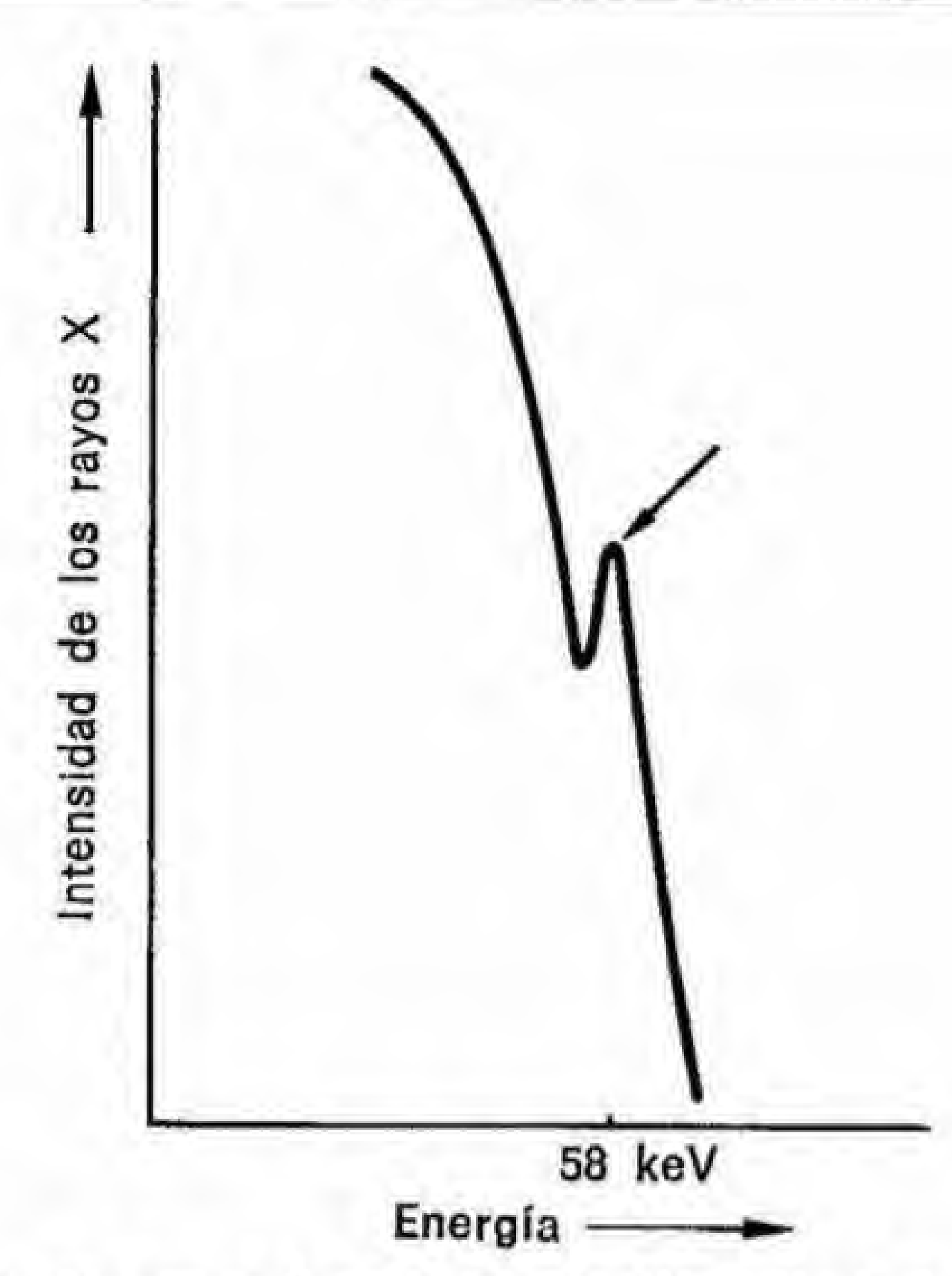
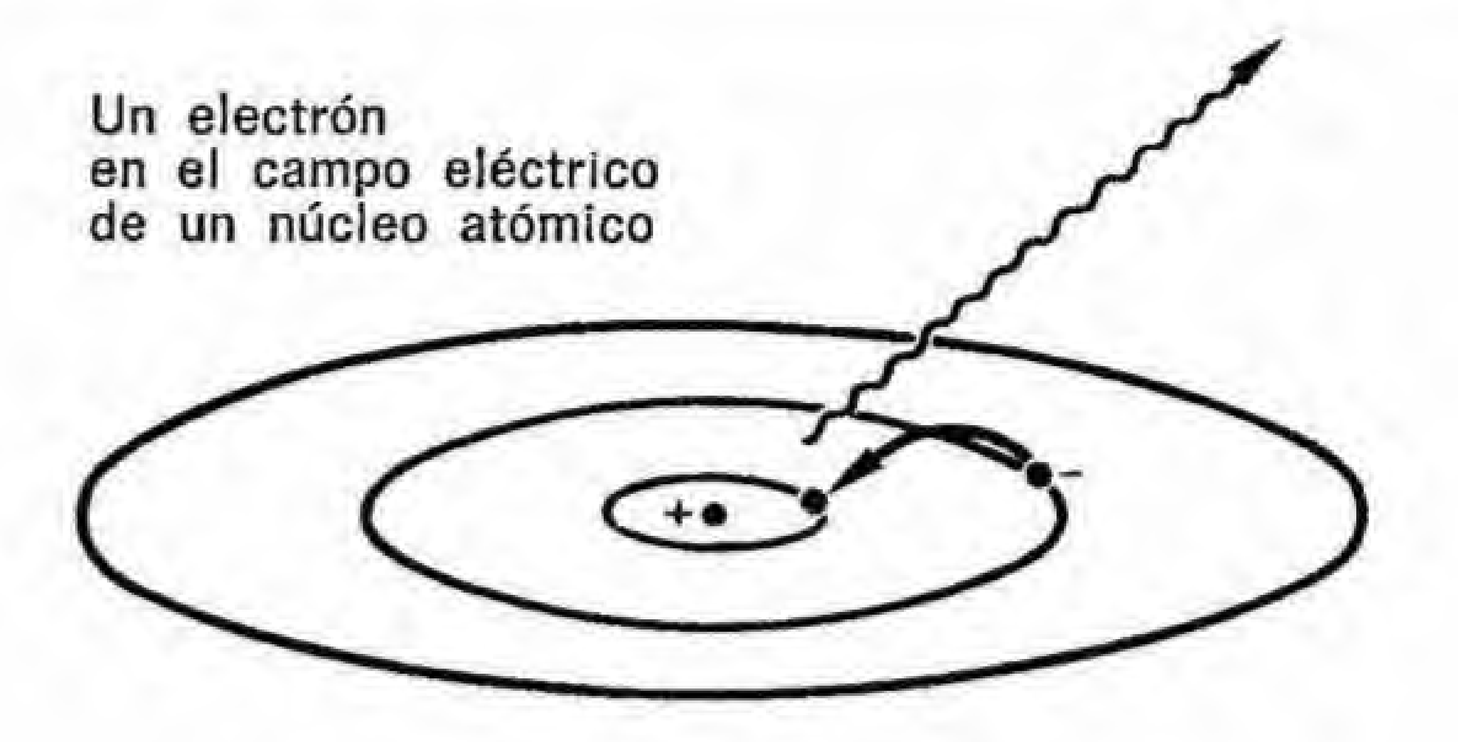


Fig. 10-12. Emisión de rayos X de la fuente Hércules X-1 en el dominio de las altas energías. Lo normal sería que la radiación de la fuente disminuyera hacia las altas energías. Sin embargo, aparece una irregularidad en los 58 kiloelectronvoltios, en forma de pico (señalado por la flecha). Cuando las energías son tan altas es difícil medir la radiación de la fuente; no es pues seguro que la distribución real de la energía siga exactamente la línea dibujada.

no hay en el mundo ningún átomo suficientemente abundante que emita con esta energía. Trümper intentó explicar la emisión mediante un mecanismo estudiado por el físico soviético Lew Landau.

La explicación se basa en que dentro de un campo magnético los electrones se desvían y describen órbitas circulares. Cuando el campo magnético es intenso, las órbitas son pequeñas. Cuando los campos magnéticos son muy intensos, las órbitas circulares llegan a ser comparables a las órbitas de los electrones en el átomo. Pero entonces interviene el principio de la mecánica cuántica que sólo permite determinadas órbitas. Los electrones, al pasar de órbitas exteriores a otras interiores, emiten cuantos con una energía determinada, exactamente, por la intensidad del campo magnético. Según Trümper y sus colaboradores esto explica la indentación en la curva de radiación de la fuente de Hércules. Si esto es cierto, el campo magnético ha de ser cien mil millones de veces más intenso que el



Un electrón en un campo magnético

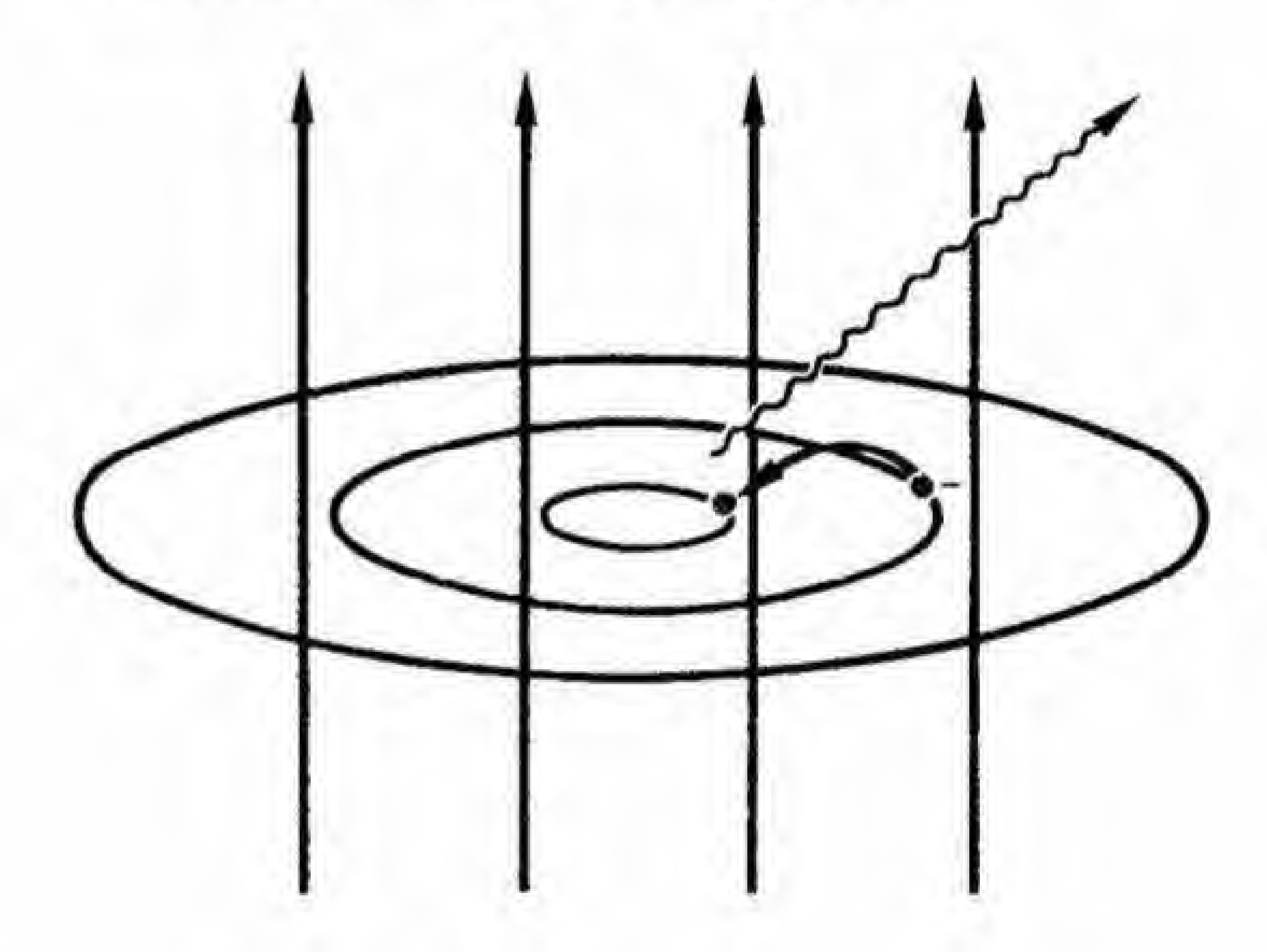


Fig. 10-13. *Arriba:* Un átomo emite radiación (flecha ondulada) cuando un electrón salta de una órbita circular exterior del núcleo atómico positivo a una interior. La radiación tiene una energía muy determinada, característica del átomo y de esta transición concreta. *Debajo:* En un campo magnético intenso (representado por las flechas rectas y verticales) los electrones sólo pueden moverse en pequeñas órbitas circulares, de modo semejante a los electrones que giran alrededor de los átomos. También en este caso se emite energía cuando un electrón de una órbita exterior pasa a una órbita interior. La energía de radiación emitida depende de la intensidad del campo magnético. Se supone que el pico observado en la distribución de intensidades de los rayos X que emite la fuente de Hércules, representada simplificadamente en la figura 10-12, se debe a estas transiciones entre órbitas de los electrones que giran en el campo magnético de una estrella de neutrones.

campo magnético terrestre. Estos campos ejercen fuerzas tan intensas que la gravedad de una enana blanca no podría equilibrarlos. Los campos destrozarían la estrella. Debemos deducir, por tanto, que la fuente de Hércules es una estrella de neutrones.

Es decir, que en el sistema doble de la fuente de Hércules la estrella de neutrones genera los rayos X. En alguna época la estrella que tenía mayor masa explotó en forma de supernova y dejó tras de sí una estrella de neutrones. Esto pasó hace mucho tiempo y la nube explosiva ha desaparecido ya. Actualmente fluye hacia la estrella de neutrones masa procedente de la estrella que era antes más pequeña y que continúa situada cerca de la secuencia principal. Cuando esta materia, conducida por el campo magnético, llega al polo magnético emite rayos X. Los electrones que se mueven dentro del campo magnético en diminutas órbitas emiten al saltar de órbitas exteriores a otras interiores la radiación que forma el pico observado en los 58 keV.

Después del Uhuru se han lanzado varios satélites más de rayos X, y se han realizado con éxito muchos experimentos con globos. Una de las dificultades de la astronomía de rayos X es que hasta ahora no se ha podido construir una cámara de rayos X. Los rayos X no pueden desviarse con lentes. Tampoco los espejos reflejan la luz de rayos X, a no ser que incida con muy poco ángulo sobre la superficie especular. En 1952, el físico Hans Wolter (1911-1978), que trabajaba a la sazón en Kiel, explotó esta característica para construir imágenes de rayos X. Desde noviembre de 1978, gira en órbita el observatorio Einstein construido por la NASA. Lleva un telescopio de rayos X de 57 centímetros. Se calcula que hay en el cielo un millón de fuentes de suficiente potencia para que pueda captarlas este instrumento. El primer *telescopio Wolter* con un diámetro de 32 centímetros voló con éxito, en febrero de 1979, a bordo de un cohete. Se ha diseñado un telescopio alemán de 80 centímetros, de próxima construcción.

ERUPCIONES DE RAYOS X

Últimamente se ha descubierto otro tipo de fuentes de rayos X, que al parecer se da con frecuencia en los cúmulos estelares. Son fuentes que emiten impulsos en forma de erupciones, los cuales a menudo duran sólo segundos, pero contienen una energía equivalente a la producción semanal total del Sol. No son tan regulares

como los impulsos de la fuente de Hércules, y al parecer no disponen del reloj en forma de astro en rotación (véase fig. 10-14). Sin embargo, los impulsos llegan en una secuencia bastante regular. De un cúmulo estelar situado en la constelación del Escorpión recibimos en ocasiones chubascos de impulsos con un ritmo de 40 segundos, que, sin embargo, no son del todo regulares. Después de una erupción intensa el período de reposo es más largo que después de una erupción débil. Probablemente también en esta fuente se precipita materia sobre un objeto compacto, pero el mecanismo que emite esta energía, no liberada de modo regular sino en forma de chubascos, parece ser distinto del mecanismo que determina los impulsos de los rayos X de la fuente de Hércules.

Vimos en el capítulo 2 que los cúmulos estelares son viejos. Desde hace tiempo ya no se forman estrellas nuevas en ellos. Estuvimos tentados a considerarlos formaciones muertas, pero los chubascos de rayos X que nos envían demuestran que todavía les anima la vida.

Quizás existan en el Universo muchas estrellas de neutrones de las que nada sabemos. Quizá todas ellas son restos de supernovas explotadas, o quizá la naturaleza dispone de otras posibilidades desconocidas hasta ahora para crear estrellas de neutrones. Nunca nos enteraremos de su existencia si no hay alguna estrella acompañante ligada a ellas que las rocíe con su masa. Entonces empiezan a despertar y a enviar rayos X.

En una conferencia que di en el año 1960, pedí a mi público que imaginara la existencia de un aparato capaz de transformar en sonido audible toda la radiación procedente del Cosmos. Además



Fig. 10-14. Las señales de la Fuente MXB 1730-335 proceden de un cúmulo estelar globular cuya existencia cobró interés por la presencia de la fuente de rayos X. Los impulsos llegan en forma de chubascos formados por un número de explosiones individuales que va de diez a veinte. Los impulsos no tienen siempre igual intensidad. La fuente necesita a menudo después de explosiones muy potentes una pausa de recuperación para poder emitir nuevos impulsos.

del susurro regular de la luz de las estrellas y de las erupciones de radio del Sol, se oiría el susurro de las fuentes de radio conocidas en aquella época, creciendo y decreciendo según el ritmo de la salida y puesta de estos objetos, que pasan sobre nosotros emitiendo con un ritmo uniforme. La emisión sería desde luego bastante aburrida. Hoy, veintiséis años después, tengo que revisar el panorama. Las fuentes recién descubiertas se sumarían a la radiación conocida en aquel entonces y animarían el cuadro sonoro del Universo. Sobre el susurro uniforme se captaría el tic-tac de los pulsares sobreponiéndose mutuamente, el zumbido profundo del pulsar del Cangrejo, cuyos pulsos el oído ya no puede distinguir individualmente, y entre ellos disparan sus tracas otras fuentes de rayos X, por ejemplo, la fuente MXB 1730-335, que emite desde un cúmulo estelar impulsos muy enérgicos, quizás una docena, sucediéndose a intervalos de 10 a 20 segundos, se detiene luego durante minutos, y después se dispara de nuevo. En el Cosmos no sólo hay susurros, también hay tic-tacs y redoble de tambores, hay zumbidos y traqueteos. Probablemente son siempre las estrellas de neutrones las responsables de este ruido que nuestro aparato imaginario ha adaptado para nuestro oído captando la radiación que nos llega del Cosmos.

¿Nos han revelado los pulsares y las estrellas de rayos X los posibles estadios finales de la vida de una estrella? ¿Sabemos ya que todas las estrellas acaban como estrellas de neutrones o como enanas blancas? Una notable propiedad de estos dos tipos de estrellas da pie a ciertas especulaciones que dejan abiertas una tercera posibilidad.

XI. EL FIN DE LAS ESTRELLAS

Aquel cuerpo esférico de color negro aterciopelado estaba suspendido, inmóvil y libre, en el espacio. En realidad el objeto no se parecía en absoluto a una esfera y daba más bien la impresión de un agujero abierto. Y en nada se diferenciaba de un agujero... Se oyó de repente un intenso murmullo que fue creciendo progresivamente, y luego la esfera absorbió el aire de la sala, llevándose consigo trocitos de papel, guantes, velos de señora. Sí, cuando un militar tiró su sable al terrible agujero, el arma desapareció como si se hubiese fundido.

Gustav Meyrink, "La esfera negra", 1913.

Los pulsares y las fuentes de rayos X demuestran que en la naturaleza hay estrellas de neutrones. La explosión de supernova que tuvo lugar en la constelación de Cáncer generó una. Sin embargo, ¿qué causa tuvo la explosión del año 1054? Convendría mucho que volviera a explotar por fin una nueva supernova en nuestra galaxia, que lo hiciera por así decirlo delante nuestro. Entonces podríamos enterarnos de lo que realmente explotó; podríamos buscar en viejas fotografías astronómicas la estrella que ahora se ha disuelto en una nube, dentro de la cual gira como una peonza una pequeña estrella de neutrones.

Hasta ahora hemos debido limitarnos a especulaciones. Podemos estudiar de nuevo nuestros modelos de estrellas muy evolucionados calculados en el computador y preguntarnos si puede saberse de antemano qué curso seguirá la estrella en su catástrofe.

LA CATÁSTROFE GLACIAL DE LAS ESTRELLAS DE GRAN MASA

La evolución de las estrellas de gran masa, las que contienen más de diez masas solares, es muy rápida. El hidrógeno se agota ya al cabo de unos millones de años. Luego se enciende el helio y se transforma en carbono, y pronto los átomos de carbono se transforman en núcleos atómicos superiores. En todas estas reacciones se libera energía, pero estos sucesivos procesos nucleares son productores de energía cada vez menos eficientes. Han de desarrollarse cada vez a mayor velocidad para que la emisión de energía de la estrella no disminuya. En rápida sucesión se construyen átomos cada vez más complicados. ¿Sigue este proceso indefinidamente?

La naturaleza ha puesto su límite en el elemento hierro. Hemos visto ya que las reacciones nucleares en las que participan elementos superiores proporcionan cada vez menos energía. El reactor nuclear de una estrella se detiene al formar el núcleo atómico del hierro. El núcleo de hierro ya no proporciona más energía cuando se fusiona con otros núcleos presentes en la estrella. Al contrario, hay que añadir energía al proceso. También para fisionarlo hay que darle energía.

Esto se debe a una propiedad del núcleo atómico. Los núcleos pesados como el uranio liberan energía cuando se fisionan, cuando a partir de ellos se fabrican núcleos cuyo peso es más parecido al del hierro, un núcleo ligero. En cambio, los núcleos más ligeros liberan energía cuando se fusionan, cuando a partir de ellos se fabrican nuevos núcleos cuyo peso está más cercano al del hierro. Sólo a partir del mismo hierro resulta imposible extraer energía.

¿Qué sucederá cuando en nuestra estrella de gran masa, la fusión de los elementos individuales haya progresado tanto que su región central sea una esfera de hierro vaporizado? (véase fig. 11-1, a la izquierda). Los núcleos atómicos del hierro pueden captar los electrones que circulan a gran velocidad en el gas. Entonces, la esfera de hierro se ha de contraer. En la esfera han de equilibrarse la gravedad y la presión gaseosa. Los electrones son los principales

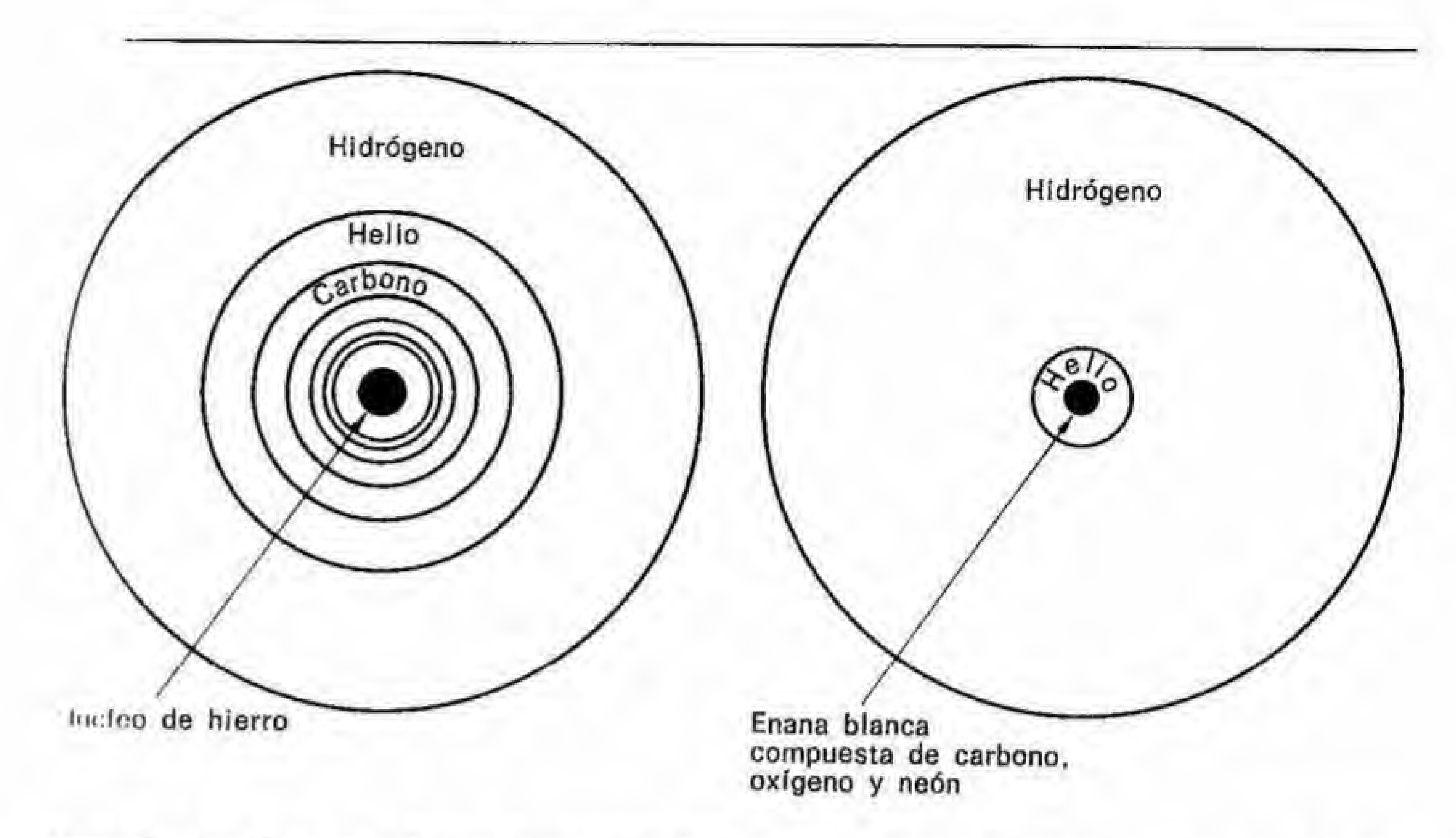


Fig. 11-1. Posibles fases preparatorias de una explosión de supernova. *Izquierda:* Una estrella de diez o más masas solares. En su interior la materia original rica en hidrógeno, que continúa formando la capa exterior, ha creado elementos superiores dispuestos uno encima de otros en envolturas esféricas concéntricas hasta llegar al centro, donde la materia es gas de hierro muy comprimido. La región central de esta estrella muy evolucionada no es estable, y puede implosionar. Esta implosión libera tanta energía que la envoltura que rodea la región central salta proyectada al espacio. *Derecha:* Una estrella de poca masa en un estado muy evolucionado. En el interior se ha formado un núcleo consistente principalmente en carbono, que tiene esencialmente las propiedades de una enana blanca. La masa del núcleo de la enana blanca crece porque en su superficie el helio se quema y se transforma en carbono. Cuando la enana blanca alcanza el límite de masas de Chandrasekhar, entra en colapso y la energía liberada en el proceso proyecta la envoltura al espacio. Ambos dibujos son esquemáticos, sobre todo no conservan la escala.

causantes de la presión gaseosa. Cuando los electrones desaparecen en los núcleos atómicos, la gravedad predomina sobre la presión gaseosa. La esfera de gas de hierro del centro de la estrella se contrae y se hunde. Se supone que este proceso empieza cuando la esfera de hierro contiene aproximadamente 1,5 masas solares. Se detiene cuando todos los componentes nucleares están tan apreta-

dos y la densidad es tan enorme que todos los protones y electrones han acabado fusionándose y formando neutrones. Sólo queda entonces materia neutrónica: la esfera de hierro, densa y gaseosa, del interior de la estrella se ha convertido en una estrella de neutrones. Esta transición libera una increíble cantidad de energía que probablemente proyecta al espacio a gran velocidad la envoltura exterior de la estrella. La estrella explota, y queda finalmente una estrella de neutrones en medio de la nube explosiva en expansión. La estrella ha finalizado su vida explotando en forma de supernova.

En muchos lugares, Chicago y Livermore (California), de Estados Unidos, y también en nuestro Instituto de Munich, se ha intentado reproducir el proceso en computador. Los cálculos necesarios son mucho más difíciles que los de las fases evolutivas normales y más largas. Sin embargo son muy excitantes, porque se supone que en las reacciones nucleares que acompañan a la explosión se sintetizan muchos de los elementos químicos presentes en la naturaleza. Probablemente todos los elementos más pesados que el helio se sintetizaron antes en alguna estrella, o bien en una fase de fusión reposada o bien en el breve intervalo de una explosión de supernova.

Las reflexiones anteriores son válidas para estrellas de masa muy grande. Las estrellas de masa inferior a diez masas solares no alcanzan con sus procesos de fusión la fase del hierro y tropiezan, ya antes, con dificultades que quizá las transformen también en supernovas. El motivo es que en su interior, como vimos en el capítulo 7, se forma una enana blanca. Las enanas blancas tienen una propiedad muy notable, relacionada con su equilibrio.

UN EXPERIMENTO MENTAL CON UNA ENANA BLANCA

Nosotros debemos nuestras vidas al equilibrio entre gravedad y presión en el Sol y en la Tierra. En general podemos confiar en este equilibrio. Si con un experimento mental comprimiéramos algo el Sol, la gravedad aumentaría, como es lógico, porque las partículas de materia estarían más próximas unas de otras, pero también aumentaría la presión en el interior, incluso más intensamente que la gravedad, y, en definitiva, el Sol volvería a la situación anterior. Y por el contrario, si una determinada fuerza perturbadora deformara el Sol aumentando su volumen pasajeramente, la gravedad disminuiría debido al aumento de volumen, porque las partículas materiales

que se atraen mutuamente se alejarían algo unas de otras. Pero al mismo tiempo la presión disminuiría, y a mayor velocidad que la gravedad, con lo que el Sol podría volver de nuevo a su situación original. Hemos dicho que podemos confiar en el equilibrio que reina en el Sol. Esto, expresado científicamente, equivale a decir que el equilibrio es *estable*. Pero no todas las estrellas viven en este estado seguro. Las enanas blancas son desde luego estables, pero pueden convertirse fácilmente en inestables.

Antes de que se supiera nada sobre la evolución de las estrellas, varios años antes de que se conociera la existencia de reacciones nucleares que transforman el hidrógeno en helio dentro de las estrellas, y mucho antes de que pudiera imaginarse la posibilidad de simular las estrellas en computadores, un indio de veinticuatro años había resuelto en Cambridge las ecuaciones que describen la estructura de una enana blanca. Este indio, nacido el año 1910 en Lahore y cuyo nombre era Subrahmanyan Chandrasekhar, había destacado ya como joven estudiante en la Universidad de Madrás. Ganó allí un concurso con un artículo, llevándose de premio la obra de Eddington sobre la estructura interna de las estrellas, que quizá le influyó para el resto de su vida. Chandrasekhar ha contribuido, hasta hoy, con aportaciones importantes a muchos campos de la astrofísica. Fue él quien demostró con su teoría de las enanas blancas que estas estrellas no pueden estar compuestas por una cantidad de material arbitrariamente elevada. Chandrasekhar recibió en 1983 el premio Nobel de física por sus trabajos sobre la teoría de las enanas blancas. Voy a explicar este hecho en forma de experimento mental.

Supongamos que nosotros fuéramos seres vivientes tan grandes que pudiéramos experimentar con estrellas, y que no tuviéramos dificultad en quitar masa de una estrella y añadirla a otra. Situémonos ahora suspendidos en el vacío en las proximidades de Sirio, donde la enana blanca Sirio A gira alrededor de Sirio B. Sirio B, compuesta por casi una masa solar, es pequeña comparada con el Sol. Su radio es sólo siete milésimas partes del radio solar. Supongamos que dispusiéramos de una gran cantidad de materia de enana blanca y aumentáramos la masa de Sirio B arrojando lentamente este material sobre su superficie: observaríamos que la estrella a medida que aumenta de masa se encoge. Después de añadir materia suficiente para que la enana blanca contenga 1,33 masas solares, su radio ha bajado a cuatro milésimas partes del radio solar. Aunque continuáramos añadiendo masa, con mucho cuidado, la contracción

sería cada vez más intensa. La presión del interior de la enana blanca cada vez contrarresta con menos eficacia la gravedad. La estrella continúa contrayéndose, pero la gravedad sube tan rápidamente que la situación empeora. Cuando la masa llega a 1,4 masas solares, la gravedad prevalece definitivamente y la estrella deja de estar en equilibrio. Esta masa crítica recibe el nombre de *masa límite de Chandrasekhar*. Una vez superada, el astro colapsa rápidamente en segundos. La densidad del gas, compuesto ahora únicamente de electrones y núcleos de helio, aumenta y pronto se inicia un proceso que ya conocemos: los electrones que se acercan a los núcleos atómicos penetran en ellos, neutralizan los protones convirtiéndolos en neutrones, y los núcleos atómicos se desintegran. Sólo quedan neutrones componiendo la materia en rápida contracción. La velocidad de la contracción aumenta cada vez más. Los neutrones caen a gran velocidad hacia el centro. Cuando la materia se ha encogido formando una esfera de sólo 10 kilómetros de radio, la presión del gas de neutrones vuelve a ser suficiente para resistir a la gravedad. El colapso se detiene y la materia deja de moverse. La energía de este movimiento se emite al espacio y queda finalmente un cuerpo en equilibrio formado principalmente por neutrones, que por tanto es una estrella de neutrones.

Éste fue nuestro experimento mental. Hemos añadido materia artificial a la enana blanca, pero el experimento no era del todo artificial. Como sabemos, en el interior de las gigantes rojas se forman enanas blancas. Están compuestas de materia que ha pasado ya por la fusión del hidrógeno y quizá también por la del helio. En su superficie todavía se está transformando el hidrógeno en helio. La fusión del hidrógeno sigue su ritmo gracias a la materia no gastada de las capas exteriores, y probablemente también continúa la fusión del helio, que se incorpora al núcleo denso de la gigante roja constituido por una enana blanca. La enana blanca aumenta de masa, pues como sucedía en nuestro experimento mental, le llega cada vez más materia (véase fig. 11-1 a la derecha). ¿Qué sucede cuando la estrella dispone de más de 1,4 masas solares, cuando alcanza y supera la masa límite de Chandrasekhar, cuando empieza a contraerse y se colapsa para formar una estrella de neutrones?

Algunos investigadores creen que en este caso no se llega a una estrella de neutrones, porque podría producirse antes una explosión de carbono. De momento, no se sabe mucho sobre este tema. Supongamos que la enana blanca del núcleo de nuestra estrella esté compuesto principalmente de carbono. Probablemente antes de que empiece la contracción el carbono entrará en ignición y explotará destruyendo toda la estrella e impidiendo la formación de una estrella de neutrones. La nube explosiva de esta supernova no contendrá en su centro una estrella de neutrones, y por tanto, no emitirá señales de pulsar. De hecho, no se ha encontrado en la posición de la supernova de Tycho de Brahe ni la de Kepler ningún pulsar, a pesar de que ambas nubes son más jóvenes que la nebulosa Cangrejo. El observatorio Einstein en órbita alrededor de la Tierra ha medido en Casiopea los restos de una supernova que explotó hace 300 años detrás de nubes absorbentes de polvo, sin que, por lo tanto, la humanidad se diera cuenta. Parece ser que en la nube no hay ninguna estrella de neutrones. ¿Es posible que una explosión de carbono hiciera desaparecer la estrella?

¿Acaban su vida todas las estrellas de poca masa en una explosión de carbono? Nadie lo sabe con certeza. Podría suceder también que el carbono después de encenderse se quemara de modo relativamente innocuo, sin destruir la estrella. Entonces la enana blanca del centro de la estrella iría aumentando de masa y al alcanzar su masa límite se contraería precipitadamente, como en nuestro experimento mental, y formaría una estrella de neutrones. Como en el caso de la catástrofe de hierro, la energía liberada en el proceso bastaría y sobraría para ofrecernos el impresionante espectáculo de una explosión de supernova. Quizá fue éste, precisamente, el proceso que causó la supernova china de 1054 y creó la nebulosa Cangrejo. Quizá su historia es la siguiente:

Hubo en otros tiempos una estrella de cinco masas solares que quemaba hidrógeno en su centro, y que al agotar el combustible nuclear de su interior se transformó en una gigante roja. Dentro de ella se encendió el helio, se agotó, y el núcleo de la estrella se transformó en carbono. El interior de la estrella era ahora una esfera de helio con una esfera de carbono incrustada en su centro, y la materia de este centro era tan densa como la de una enana blanca. En la superficie de la esfera de helio el hidrógeno quemaba y se transformaba en helio, y en la frontera entre el helio y el carbono, el helio se quemaba y se convertía en carbono. De este modo la masa de este núcleo, que en realidad era una enana blanca, fue creciendo progresivamente mientras se contraía la esfera del centro de la gigante roja. Cuando en el año 1054 esta esfera alcanzó 1,4 masas solares, se colapsó catastróficamente. Ya ni la combustión del carbono podía detener la contracción. Se liberaron enormes cantida-

des de energía y la explosión eyectó al espacio la envoltura de la estrella. La envoltura todavía hoy está en el cielo y se llama nebulosa Cangrejo. La enana blanca se transformó en el intervalo de un minuto en una estrella de neutrones, que todavía hoy emite las señales del pulsar del Cangrejo.

¿Cuál de las tres posibilidades causó realmente la explosión de esta supernova? ¿Fue el núcleo de hierro formado en el interior de la estrella que se contrajo en una implosión? ¿Fue la enana blanca que como un tumor canceroso fue absorbiendo cada vez más materia de la estrella hasta superar su masa crítica y hundirse también en una implosión? ¿O fue la detonación del carbono que destruyó la estrella antes de que la enana blanca pudiera convertirse en una estrella de neutrones?

En otras galaxias se observan dos tipos de supernovas que se diferencian por la luz que emiten al explotar. Quizás actúen todos los mecanismos que acabamos de discutir. Quizá las estrellas de gran masa se colapsan por culpa de su núcleo de hierro, y las estrellas de 10 a 1,4 masas solares lo hacen a causa de la enana blanca que crece en su interior, tanto si explotan por el carbono como si explotan al formarse una estrella de neutrones.

Sólo las estrellas cuya masa es inferior a 1,4 masas solares y las que se liberan a tiempo del exceso de masa gracias al viento solar o a la emisión de una nebulosa planetaria pueden esperar un final reposado. Se transforman entonces en enanas blancas, en astros donde ya no tienen lugar más reacciones nucleares y que conservan su equilibrio estable.

UN EXPERIMENTO MENTAL CON UNA ESTRELLA DE NEUTRONES

Pero también las estrellas de neutrones tienen problemas con el equilibrio. Hagamos nuevamente un experimento mental. Supongamos que tenemos el pulsar del Cangrejo, formado quizá por materia neutrónica de una masa solar, y supongamos que podemos aumentar la masa de la estrella de neutrones con un experimento cósmico consistente en depositar cuidadosamente materia neutrónica sobre su superficie. También ahora el radio de la estrella se contraerá al aumentar la masa, signo nuevamente de que la gravedad predomina cada vez más sobre la presión. Cuando este cuerpo enri-

quecido alcanza aproximadamente dos masas solares, continúa contrayéndose, pero a tal velocidad que el proceso se completa en una mínima fracción de segundo. ¿Es posible detener este proceso? ¿Puede transformarse la materia en un nuevo material cuya presión consiga equilibrar la gravedad, como hizo la enana blanca al transformarse su materia en neutrones y crearse un nuevo equilibrio? Los físicos creen hoy en día que nada puede salvar la materia neutrónica en rápida contracción.

La gravedad cada vez es más intensa y pronto la presión deja de jugar papel alguno, con lo que el cuerpo se contrae eternamente. En los alrededores de esta masa en colapso, la gravedad es muy intensa; la teoría general de la relatividad de Albert Einstein describe este comportamiento de la naturaleza. Explica por ejemplo la influencia de la gravedad sobre la propagación de la luz. El Sol actúa como una lente sobre la luz estelar que llega a la Tierra rozando su disco. El campo estelar ante el cual está situado el Sol aparece algo ampliado. Pero el efecto es muy pequeño, en el límite mismo de precisión de nuestros instrumentos, y sólo puede observarse cuando el disco solar queda ocultado por la Luna en un eclipse total de Sol y las estrellas aparecen en el cielo de día. Durante los pocos

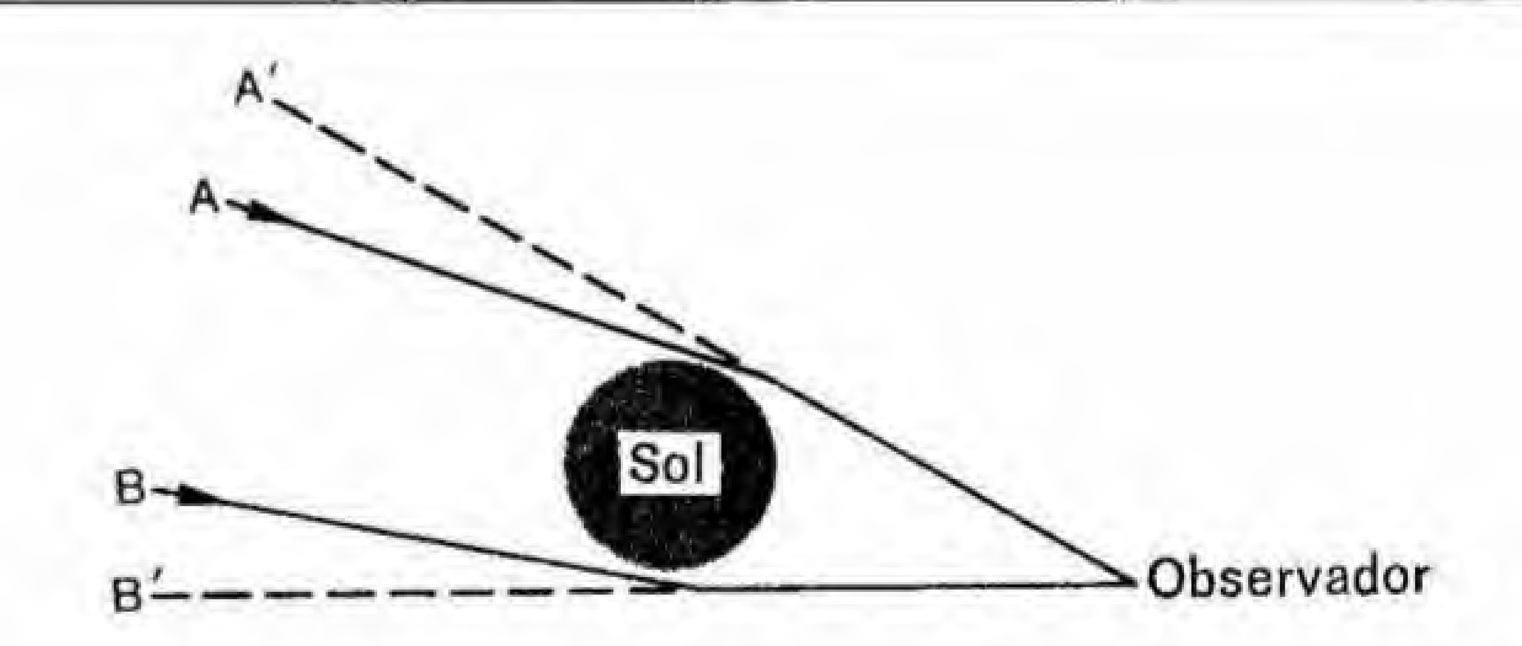


Fig. 11-2. Desviación de la luz por la gravedad del Sol. Dos estrellas alejadas emiten luz en todas direcciones. Dos rayos de luz A y B que pasan rozando el Sol están dibujados como líneas rojas. La gravedad del Sol desvía la luz. Cuando un observador en la Tierra mira los dos rayos, parece que le lleguen de las dos direcciones A' y B' indicadas por las líneas de trazos. Las estrellas aparecen situadas ahora en el cielo con una separación superior a la de otras épocas del año, cuando el Sol ocupa otra posición en el firmamento y no ejerce su influencia sobre la luz de los rayos que envían las dos estrellas. La gravedad del Sol actúa como una lupa que en el transcurso del año se desplaza por el cielo y amplía el fondo estelar que tiene detrás (aparte del fondo que oculta con su disco). El efecto es muy pequeño y sólo puede medirse en los eclipses totales de Sol.

minutos en que dura este espectáculo de la naturaleza puede medirse la curvatura de los rayos luminosos que rozan el Sol. Se ha comprobado que la luz se desvía realmente como predice la teoría de la relatividad.

El efecto de la desviación de los rayos luminosos por la gravedad juega un papel importante cuando la materia de nuestra estrella de neutrones no encuentra freno alguno y entra en colapso. Supongamos que podemos seguir lentamente este proceso. Al principio, la estrella de neutrones está todavía en equilibrio. Pero en su superficie ya empieza a notarse la curvatura de los rayos luminosos, porque la gravedad es muy grande. El rayo de luz emitido oblicuamente hacia arriba desde la superficie presenta una clara curvatura hasta que se ha alejado lo suficiente de la intensa gravedad y puede continuar a través del espacio en línea recta (véase fig. 11-3 [a]).

Si ahora la masa de la estrella de neutrones crece lentamente y empieza el colapso porque la presión interior resulta insuficiente, la gravedad aumenta rápidamente. Pronto la curvatura de la luz es tan intensa que un rayo horizontal a la superficie del cuerpo da varias vueltas a su alrededor antes de poder escapar al espacio. Cada vez le cuesta más a la luz luchar contra la gravedad y cuando el cuerpo colapsante, cuya masa suponemos de tres masas solares alcanza el radio de 8,85 kilómetros, la luz ya no puede salir de la superficie hacia fuera. La gravedad curva tan intensamente los rayos de luz emitidos que éstos vuelven a caer al cuerpo. Los cuantos de luz que el cuerpo emite vuelven a caer sobre él como las piedras que tiramos en la tierra hacia lo alto. Ningún rayo de luz puede informar al mundo del destino trágico de nuestra estrella. Un cuerpo así recibe el nombre de *agujero negro*.

LOS AGUJEROS NEGROS

Hemos visto que un cuerpo comprimido muy intensamente al cabo de un tiempo ya no puede enviar luz al exterior. Karl Schwarzschild calculó por primera vez el radio que corresponde a esta situación. Schwarzschild, probablemente el mayor astrofísico de la primera mitad de este siglo, hizo numerosas contribuciones normativas a muchos campos de la astrofísica. Cuando Einstein hubo fijado las ecuaciones de la teoría de la relatividad general, Karl Schwarzschild ofreció poco antes de su muerte la primera solución exacta. Esta solución contiene el efecto del agujero negro. Karl Schwarzschild

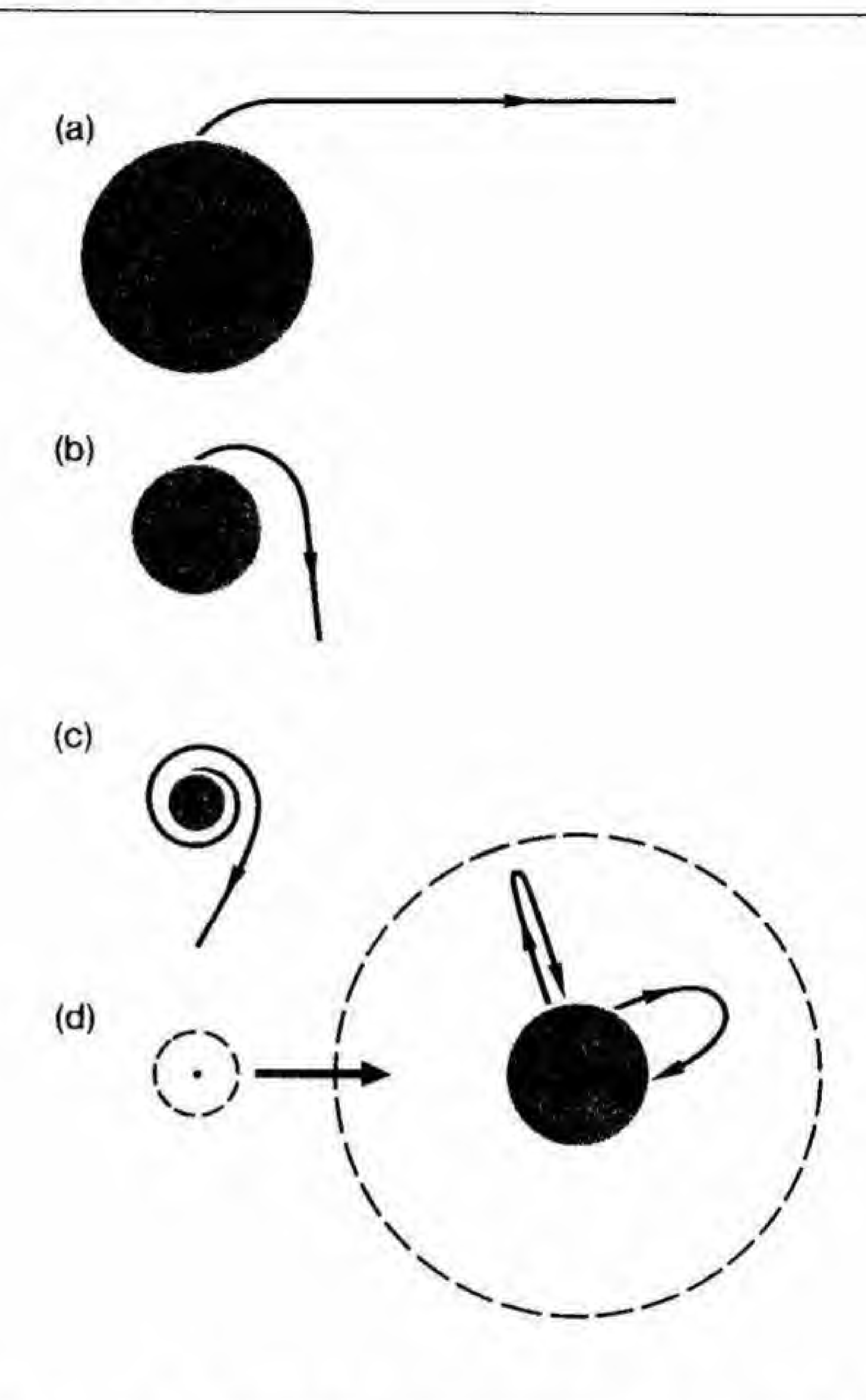


Fig. 11-3. Desviación de la luz en las proximidades de una estrella de neutrones en colapso. (a) La luz emitida por la estrella se curva cerca de su superficie. (b) Cuanto más pequeño es el radio de la estrella, más fuerte es la curvatura, de modo que en (c) un rayo de luz emitido oblicuamente por la superficie ha de luchar contra la gravedad y recorrer varias vueltas de espiral antes de poder escapar de la estrella. (d) La estrella es ahora más pequeña que su radio de Schwarzschild. Todos los rayos luminosos que emite su superficie se curvan y caen de nuevo sobre la estrella. El dibujo de la izquierda en (d) está ampliado el doble en relación a (c). La estrella es ahora muy pequeña en comparación con las fases anteriores y en el dibujo de la derecha aparece más ampliada todavía. Los círculos discontinuos representan esferas con el radio de Schwarzschild.

fue director de los observatorios de Gotinga y Potsdam. Murió en 1916 cuando tenía cuarenta y tres años a consecuencia de una dolencia sufrida durante su servicio en la guerra. Su tumba está en el cementerio central de Gotinga.

El radio hasta el cual debe comprimirse un cuerpo para que la luz no pueda ya escapar al exterior se llama *radio de Schwarzschild.* En el caso del Sol es de unos tres kilómetros. Si comprimiéramos el Sol hasta este radio o a un valor inferior, no podría escapar su luz al exterior. Puede calcularse el radio de Schwarzschild para un cuerpo cualquiera. Cuanto más pequeña es la masa, más reducido es este radio. El radio de Schwarzschild correspondiente a la cantidad de materia de una persona es tan pequeño que, expresado en centímetros, siguen al cero y a la coma 21 ceros antes de la primera cifra significativa. Si comprimimos una persona hasta este radio tan pequeño, su luz dejará de llegar al mundo exterior.

Cuando un astro se pierde en un agujero negro, no ha desaparecido en absoluto del mundo. Su gravedad permite reconocerlo desde el exterior: la luz que se le acerca queda atrapada, la luz que pasa a mayor distancia se desvía. Su gravedad puede retener a otros cuerpos junto a él. El agujero negro puede tener planetas a su alrededor y puede estar ligado con otra estrella formando un sistema doble.

Hasta ahora todo han sido experimentos mentales. ¿Existen agujeros negros en la naturaleza? Nos cuesta imaginar que sobre una estrella de neutrones caiga tanta materia que el aumento consiguiente de masa supere la resistencia del astro. En una estrella doble de rayos X cae tan poca materia sobre la estrella de neutrones que mientras dura la vida de la estrella donante la masa de la estrella de neutrones no aumenta de modo apreciable. ¿Pero qué sabemos sobre el origen de una estrella de neutrones? Solamente que el pulsar del Cangrejo es el resto de una supernova. ¿Y qué sabemos sobre una explosión de supernova? Pudiera ser que después de la explosión de la envoltura la masa restante fuera tan grande que la estrella de neutrones no pudiera mantenerse en equilibrio, entrara en colapso y formara un agujero negro. Existen fundadas sospechas de que en algunas estrellas dobles de rayos X el astro compacto que envía los rayos X no es una estrella de neutrones sino un agujero negro. La materia procedente de la estrella acompañante, antes de hacerse invisible en el interior del agujero negro, se calienta intensamente y emite rayos X. El movimiento de la estrella visible determinado con ayuda del efecto Doppler (véase Apéndice A) permite

deducir la masa de la fuente de rayos X. Se cree que en la fuente Cygnus X-1 hay más de tres masas solares en el astro compacto. Este cuerpo no puede ser ya una estrella de neutrones. ¿Es un agujero negro? De momento la masa calculada no es muy segura. Es decir, que todavía no se dispone de una demostración inequívoca de la existencia de un agujero negro.

Últimamente los agujeros negros aparecen en la literatura científica e incluso en la prensa diaria con mucho mayor frecuencia que en la misma naturaleza. Se ha puesto de moda recurrir a un agujero negro para explicar cosas que no pueden esclarecerse de modo natural y convertir a los agujeros negros en responsables de los fenómenos cósmicos más variados e inexplicables. En una librería de Londres vi un libro sobre "Black Holes" en un estante de libros de ocultismo. Sin duda, el librero inglés había captado con sensibilidad la situación de la astrofísica moderna.

Parece que el destino final de una estrella consiste en acabar como una honrada enana blanca, y enfriarse lentamente, o en acabar como una estrella de neutrones que en sus primeros tiempos emite impulsos de radio y que cuando llueve sobre ella materia procedente de algún dador hace notar su presencia en forma de estrella de rayos X.

Si al final de la evolución de una estrella sobra mucha masa, demasiada para formar una enana blanca, demasiada para que una estrella de neutrones se mantenga en equilibrio, el destino de este astro final es contraerse eternamente dentro de un agujero negro.

Las estrellas acaban su vida como astros compactos en los que la materia permanece atrapada para siempre. Es cierto que antes habían proyectado al espacio parte de su masa, materia que luego queda a disposición de otras estrellas nacientes. Incluso la materia que forma nuestro cuerpo humano se coció con toda seguridad en otros tiempos en el interior de una estrella. Pero casi siempre queda un cuerpo compacto, y al final quizá toda la materia del Universo se habrá condensado en forma de enanas blancas o de estrellas de neutrones en proceso de enfriamiento o bien quedará atrapada en los agujeros negros, alrededor de los cuales girarán tristemente los planetas congelados. Parece que el Universo se dirige hacia un futuro bastante aburrido.

XII. CÓMO NACEN LAS ESTRELLAS

Hemos seguido la vida de las estrellas desde la primera ignición del hidrógeno en su juventud hasta su avanzada senectud. Pero, ¿qué había antes? ¿De dónde proceden las estrellas cuya historia hemos estudiado? ¿Cómo se han formado y a partir de qué?

Las estrellas tienen una vida finita, por tanto tuvieron que formarse antes de un tiempo finito. ¿Qué podemos saber de este proceso? ¿Podemos presenciar en algún lugar del cielo la formación de estrellas? ¿Somos testigos de su nacimiento? Cien mil millones de estrellas constituyen el disco plano de nuestra galaxia; ¿nos proporciona algún lugar de este disco una pista sobre su origen?

TODAVÍA HOY NACEN ESTRELLAS

Lo que hemos aprendido hasta ahora nos da la clave del problema. Hemos visto que las estrellas de gran masa, las que tienen 10 ó más masas solares, envejecen pronto. Gastan alocadamente su hidrógeno y no permanecen mucho tiempo en la secuencia principal. O sea, que cuando vemos una estrella de gran masa en la secuencia principal ya podemos afirmar que su edad no es muy grande. Reconocemos estas estrellas por su gran luminosidad; su luz es azul, porque su temperatura superficial es elevada. Por tanto, las estrellas azules y muy luminosas son todavía jóvenes: tienen apenas un millón de años de edad, lo cual es realmente poco en comparación con los miles de millones de años pasados desde que nuestro Sol empezó a brillar. Quien quiera buscar lugares en el espacio donde se formaron recientemente estrellas, debe dejarse guiar por estre-

llas brillantes y azules de la secuencia principal. Allí donde las encuentre nacieron hace poco estrellas, y es posible que incluso ahora se estén formando estrellas.

En el cielo se observan nidos enteros de estrellas brillantes y azules. ¿Qué descubrimos en estos lugares? ¿Indican estas estrellas cómo se formaron? Generalmente entre estas estrellas se observan intensas concentraciones de gas y de polvo. La nebulosa de Orión es uno de estos lugares (véase fig. 12-1, en las páginas centrales del libro). En su interior están incrustadas estrellas brillantes y azules, de edad no superior a un millón de años. En la constelación de Sagitario las estrellas jóvenes están ocultas tras una espesa nube de polvo. Hans Elsässer y sus colaboradores del Observatorio hispanoalemán de Calar Alto, consiguieron mediante observaciones en luz infrarroja de gran longitud de onda atravesar fotográficamente la nube y estudiar las estrellas recién formadas.

Sabemos ya que el espacio interestelar no está vacío, sino lleno de masas de gas y polvo. La densidad del gas es de sólo un átomo de hidrógeno por centímetro cúbico y la temperatura se sitúa en menos 170 grados centígrados. El polvo interestelar es mucho más frío, pues llega a menos 260 grados centígrados. Pero en los lugares donde hay estrellas jóvenes la materia interestelar es diferente. Nubes oscuras de polvo tapan la luz de las estrellas situadas detrás suyo. Las nubes de gas, que brillan calentadas por las estrellas vecinas, alcanzan 10.000 grados de temperatura y densidades de decenas de miles de átomos por centímetro cúbico. Moléculas complicadas como el ácido fórmico y el alcohol emiten con sus longitudes de onda características en el dominio de radio. La concentración de la materia interestelar en estos lugares hace suponer que las estrellas se forman a partir de gas interestelar.

Apoya también esta idea una reflexión que debemos al astrofísico inglés James Jeans, un contemporáneo de Eddington. Imaginemos el espacio lleno de gas interestelar. Cada uno de sus átomos ejerce una atracción gravitatoria sobre los restantes, y el gas podría condensarse. Generalmente, la presión gaseosa impide la condensación, y tenemos un equilibrio muy parecido al del interior de las estrellas, donde la gravedad y la presión gaseosa se mantienen equilibradas. Cojamos ahora una cantidad determinada de gas interestelar y comprimámoslo mentalmente. Al comprimir los átomos, éstos se acercan y crece su atracción. Pero al mismo tiempo, la presión gaseosa aumenta, en general, más intensamente que la gravedad, y el gas que acabamos de comprimir se expandirá de nuevo

volviendo a su estado original. Decimos que el gas interestelar es *estable*. Pero Jeans descubrió que esta estabilidad no es muy grande. Basta comprimir simultáneamente una cantidad suficientemente grande de materia para que la gravedad crezca más rápidamente que la presión gaseosa, y la nube continúe condensándose. Cuando esto sucede se condensa a la vez una gran cantidad de materia impulsada por la gravedad. Unas 10.000 masas solares del medio interestelar se vuelven *inestables* simultáneamente. Quizás se deba a esto que siempre observemos las estrellas jóvenes en grupos. Los partos estelares son siempre múltiples. Es probable que al contraerse 10.000 masas solares de gas y de polvo interestelar con una velocidad creciente, se formen nubes parciales de gas, que a su vez se condensarán por separado. De cada una de estas nubes separadas nacerá más tarde una estrella.

EL NACIMIENTO DE UNA ESTRELLA EN EL COMPUTADOR

Un joven astrofísico canadiense, Richard B. Larson, describió el nacimiento de una estrella en su tesis doctoral presentada ante la Universidad de Yale. Esta tesis se convirtió en una obra básica de la moderna literatura astrofísica. Larson estudió la formación de una estrella sola a partir de materia interestelar. Sus cálculos son la detallada expresión del destino de una nube individual.

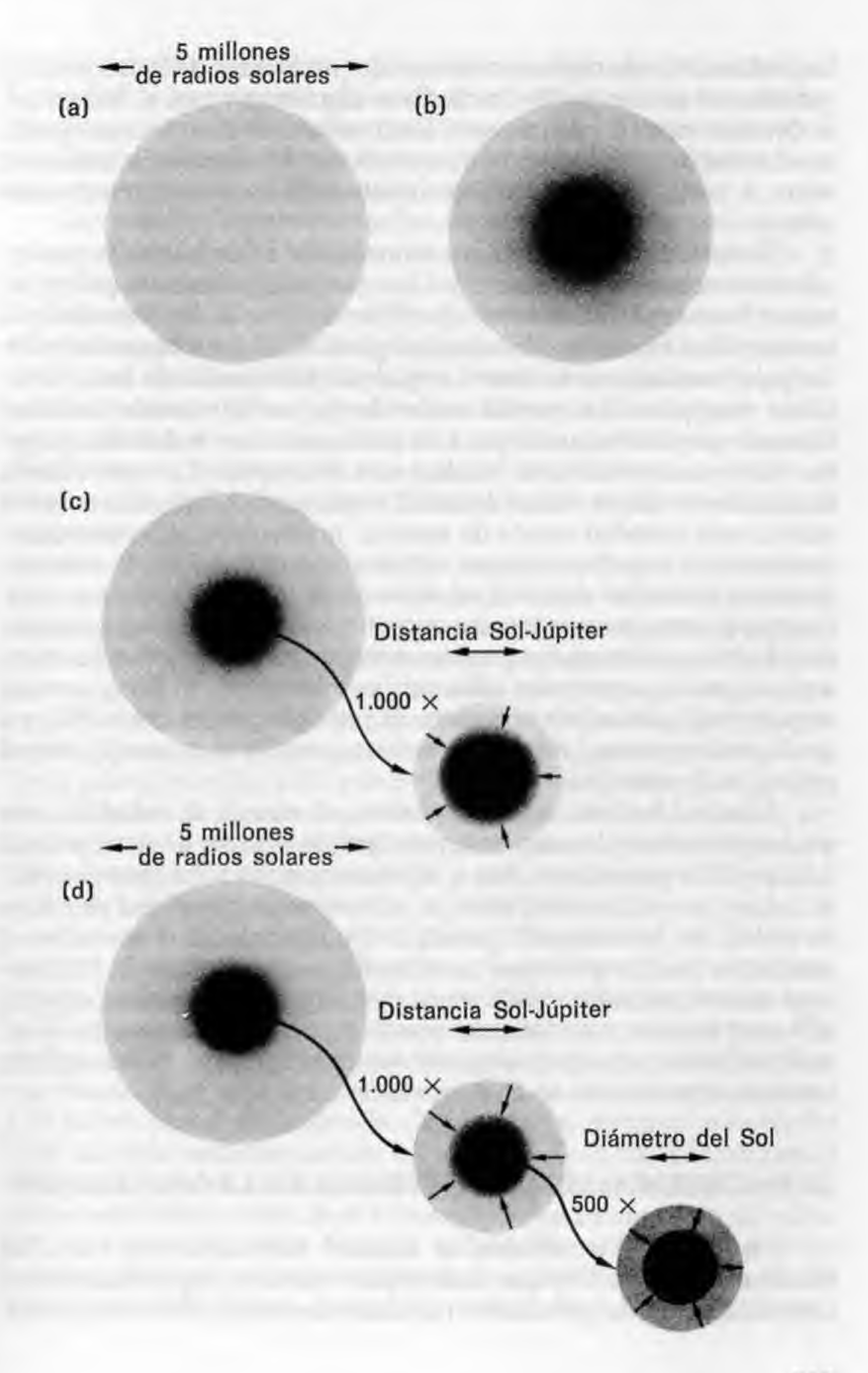
Larson imaginó una nube esférica de exactamente una masa solar y siguió su evolución con un programa de computador que simulaba, de la mejor manera posible entonces, el colapso de una nube de gas. Larson no partió del medio interestelar, sino de una nube parcial ya condensada, de un fragmento del gran proceso de colapso. La nube en cuestión está ya más condensada que el medio interestelar: hay 60.000 átomos de hidrógeno en un centímetro cúbico. El diámetro de la nube inicial de Larson es cinco millones de veces superior al del Sol que esta materia acabará formando. Todo lo que viene a continuación acontece en un tiempo astrofísicamente muy breve: a saber, 500.000 años.

El gas es al principio transparente, cada partícula de polvo emite en cada instante luz y calor, y esta radiación no es retenida por el gas circundante, sino que escapa sin obstáculos al espacio. A partir de este modelo inicial transparente el futuro de la esfera gaseosa está ya determinado. El gas se precipita en caída libre hacia el centro y, en consecuencia, se acumula materia en la zona central. La

masa inicialmente homogénea forma ahora una esfera de gas, cuya densidad va creciendo hacia el centro (véase fig. 12-12). La aceleración de la gravedad, en las proximidades de este centro, es cada vez mayor, y la velocidad de la materia crece, especialmente en la zona interior. Al principio, casi todo el hidrógeno está presente en forma de moléculas de hidrógeno: dos átomos de hidrógeno se enlazan firmemente y constituyen una molécula. La baja temperatura del gas al principio apenas aumenta. El gas continúa tan enrarecido que toda la radiación escapa hacia fuera y la esfera de gas en contracción no se calienta apreciablemente. Al cabo de unos cuantos cientos de miles de años, la densidad en la zona central ha aumentado tanto que el gas se vuelve opaco a la radiación que hasta ahora conducía el calor hacia fuera. Se calienta, así, en el interior de nuestra gran esfera gaseosa, un núcleo cuyo diámetro es 1/250 del espacio original, donde la materia continúa cayendo hacia el centro. Con la temperatura sube también la presión y finalmente se interrumpe el colapso. El radio de la zona condensada alcanza aproximadamente la órbita de Júpiter, pero sólo contiene un medio por ciento de la masa total que participa en el colapso. Cae continuamente más masa sobre el pequeño núcleo del interior. Esta masa trae consigo energía que emite cuando llega al núcleo. Pero el núcleo se contrae simultáneamente y, así, aumenta de temperatura.

El proceso continúa hasta que se ha alcanzado una temperatura de unos 2.000 grados. Entonces las moléculas de hidrógeno empiezan a disociarse y se transforman de nuevo en átomos. Este proceso tiene una consecuencia importante para el núcleo: el núcleo vuelve a contraerse hasta que toda la energía liberada en el colapso

Fig. 12-2. Modelo de Larson sobre el nacimiento del Sol. (a) Una nube de gas interestelar empieza a contraerse. Al principio, la densidad de su interior es idéntica en todas partes. (b) Al cabo de 390.000 años, la densidad en el centro de la nube se ha centuplicado. (c) Pasados 423.000 años desde el inicio del proceso aparece en el interior de la condensación neutral un núcleo caliente, que al principio no se contrae más. Está representado en el dibujo a escala ampliada. Su densidad es diez millones de veces superior a la densidad inicial. La masa principal continúa situada en la nube que rodea este núcleo y que prosigue su contracción. (d) Poco después, cuando en el núcleo las moléculas de hidrógeno se disocian dando átomos individuales, el núcleo se contrae de nuevo y forma un nuevo núcleo que ya tiene más o menos el tamaño del Sol (y que en la figura está ampliado al doble). Al principio, su masa es reducida pero con el transcurso del tiempo toda la masa de la nube acabará precipitándose sobre él. Entonces, la zona central del núcleo se calentará tanto, que el hidrógeno se encenderá y nacerá una estrella de la secuencia principal con una masa solar.



haya disociado de nuevo en átomos las moléculas de hidrógeno. El tamaño del núcleo recién formado es algo mayor que el Sol actual. Sobre este núcleo central caerá finalmente toda la masa que queda en el exterior, y el núcleo se convertirá en una estrella de una masa solar. A partir de ahora, prácticamente sólo tiene importancia este núcleo.

El núcleo se transforma paulatinamente en una estrella que recibe el nombre de *"protoestrella"*. La energía que emite es principalmente la energía de la materia que llueve sobre él. La densidad y la temperatura aumentan, los átomos pierden su envoltura electrónica, y decimos que se *ionizan*. Lo que puede verse desde fuera todavía es muy poco. La estrella está rodeada por una densa envoltura formada por las masas de gas y de polvo que caen sobre ella, y que no dejan pasar radiación visible hacia el exterior. La protoestrella ilumina la envoltura desde dentro. Luego, cuando ha caído sobre el núcleo una cantidad mayor de materia, la envoltura se vuelve transparente y la estrella empieza a brillar con luz visible. Y mientras continúa lloviendo sobre él, el resto de la nube, el núcleo se condensa y su temperatura interior aumenta hasta alcanzar en su centro los 10 millones de grados y entrar el hidrógeno en ignición. La nube en colapso de una masa solar se ha convertido, al final, en una estrella muy normal de la secuencia principal: el primitivo Sol, y a partir de este punto la historia continúa como la hemos explicado al principio de este libro.

Hacia el final de la fase protoestelar, cuando la estrella no ha alcanzado todavía la secuencia principal, la energía de su interior es transportada por convección a extensas regiones. La materia solar se mezcla enérgicamente una vez más antes de que el Sol primitivo se instale en la secuencia principal. De este modo, se resuelve el problema del litio solar que comentamos en el capítulo 5. Los átomos de este elemento, fácilmente desintegrable, son transportados a la zona interior, más caliente, donde antes de que la estrella alcance la secuencia principal se transforman en átomos de helio según la reacción reproducida en la figura 5-3.

EL NACIMIENTO DE UNA ESTRELLA EN LA NATURALEZA

Hasta aquí los cálculos de Larson, realizados con todas las idealizaciones que hay que aplicar para resolver el problema en el computador. Pero, ¿es cierto el proceso descrito? ¿Tiene lugar realmente, no sólo en el computador sino también en la naturaleza? Volvamos a las regiones del cielo donde todavía nacen estrellas, volvamos a las estrellas brillantes y azules, o sea, a las estrellas jóvenes. Busquemos allí indicios de nacimientos estelares: objetos como los que predicen los cálculos de Larson.

Las estrellas brillantes y azules son muy calientes, pues sus temperaturas superficiales se sitúan en los 35.000 grados. Por tanto, la radiación que emiten tiene una energía muy alta. Sus cuantos de luz pueden arrancar el electrón de los átomos de hidrógeno del medio interestelar, y dejar el núcleo atómico positivo solo. El hidrógeno se ioniza. Las estrellas brillantes de gran masa ionizan las masas gaseosas circundantes. Estas regiones de nuestra galaxia destacan por la luminosidad que emiten los átomos ionizados de hidrógeno cuando recuperan sus electrones. Las regiones de hidrógeno ionizado se notan por su brillo. Su emisión térmica puede medirse también en el dominio de radio.

Las mediciones de radio tienen la ventaja de que las masas de polvo absorbente no las falsean. El ejemplo más bello de una región celeste donde las estrellas brillantes y de gran masa hacen brillar por excitación la materia interestelar es de nuevo la nebulosa de Orión (véase fig. 12-1). ¿Hay astros en aquella nebulosa que tengan alguna relación con los procesos calculados por Larson? ¿Qué hay que buscar? Durante la mayor parte del tiempo la protoestrella está cubierta por su envoltura de polvo que envía lentamente lluvia sobre ella. El polvo de la envoltura absorbe la radiación del núcleo, por tanto retiene la energía, se calienta a varios centenares de grados y emite la radiación correspondiente a esta temperatura. Esta radiación térmica debe captarse en el dominio infrarrojo.

En el año 1967, Eric Becklin y Gerry Neugebauer, del California Institute of Technology, en Pasadena, descubrieron una estrella infrarroja en la nebulosa de Orión, cuya luminosidad equivale a unas 1.000 luminosidades solares, y cuya temperatura radiante es de 700 grados. El diámetro del astro tendría que ser de unos 1.000 diámetros solares. Éste sería exactamente el aspecto de la envoltura de gas y de polvo de una protoestrella. En los últimos tiempos se ha hecho cada vez más evidente que en las regiones de la Vía Láctea donde hoy en día pueden estar naciendo estrellas, existen fuentes compactas de radiación no sólo en el infrarrojo sino en el dominio de radio. Así, por ejemplo, Peter Mezger, radioastrónomo de Bonn y sus colaboradores encontraron en la nebulosa de Orión regiones de alta densidad de hidrógeno, que emiten ondas de radio especialmente

potentes. En estas regiones el número de electrones libres, separados del átomo de hidrógeno, por centímetro cúbico es cien veces superior al de la nebulosa de Orión circundante. Estos cuerpos son muy pequeños en comparación con la región entera de Orión. Se calcula que su tamaño es de unos 500.000 diámetros solares, o sea, cuatro veces más pequeños que la nube de Larson que llueve sobre el núcleo de su modelo.

Además, en la región de la nebulosa de Orión se encuentran zonas de pequeño diámetro de las que nos llega radiación molecular, especialmente radiación de la molécula del agua. Las moléculas emiten en el dominio de radio y pueden captarse con el radiotelescopio. También ellas ocupan zonas espaciales pequeñas y compactas, algunas de sólo 1.000 diámetros solares. Recordemos que la nube de Larson al principio tenía un diámetro de varios millones de radios solares. Las ondas de radio de las moléculas tienen que proceder del núcleo central.

De todos modos hay que ir con cuidado al hacer estas interpretaciones. Lo único seguro es que en la región de la nebulosa de Orión existen objetos inobservables ópticamente que presentan una intensa concentración de gas y de polvo, y que corresponden exactamente a lo que sería una nube de Larson.

Pero hay más elementos que permiten considerar las fuentes concentradas de radio y de infrarrojos como auténticas protoestrellas. Hace poco, en nuestro Instituto, un grupo dirigido por el astrónomo austríaco Werner Tscharnuter ha repetido los cálculos de Larson con mejores métodos. Los científicos han calculado también el curso de la radiación en el infrarrojo. La coincidencia con la observación fue asombrosa. Parecía como si se estuviera observando realmente la protoestrella simulada por el computador.

Después de seguir tan de cerca el rastro del nacimiento de una estrella, podemos preguntarnos si el origen de los centenares de miles de millones de estrellas de nuestra galaxia puede explicarse de este modo. La figura 12-3 representa esquemáticamente la estructura de nuestro sistema estelar. No todas las estrellas están en el disco, las más viejas se encuentran en un dominio espacial casi esférico denominado *halo*. Las estrellas del halo son viejas, como se deduce de los diagramas HR de los cúmulos estelares situados en esta región. Si su composición química se compara con la del Sol, son más pobres en elementos más pesados que el helio. A menudo, tienen diez veces menos cantidad de estos elementos. Todas las estrellas más jóvenes están situadas en el disco, y su materia contiene más

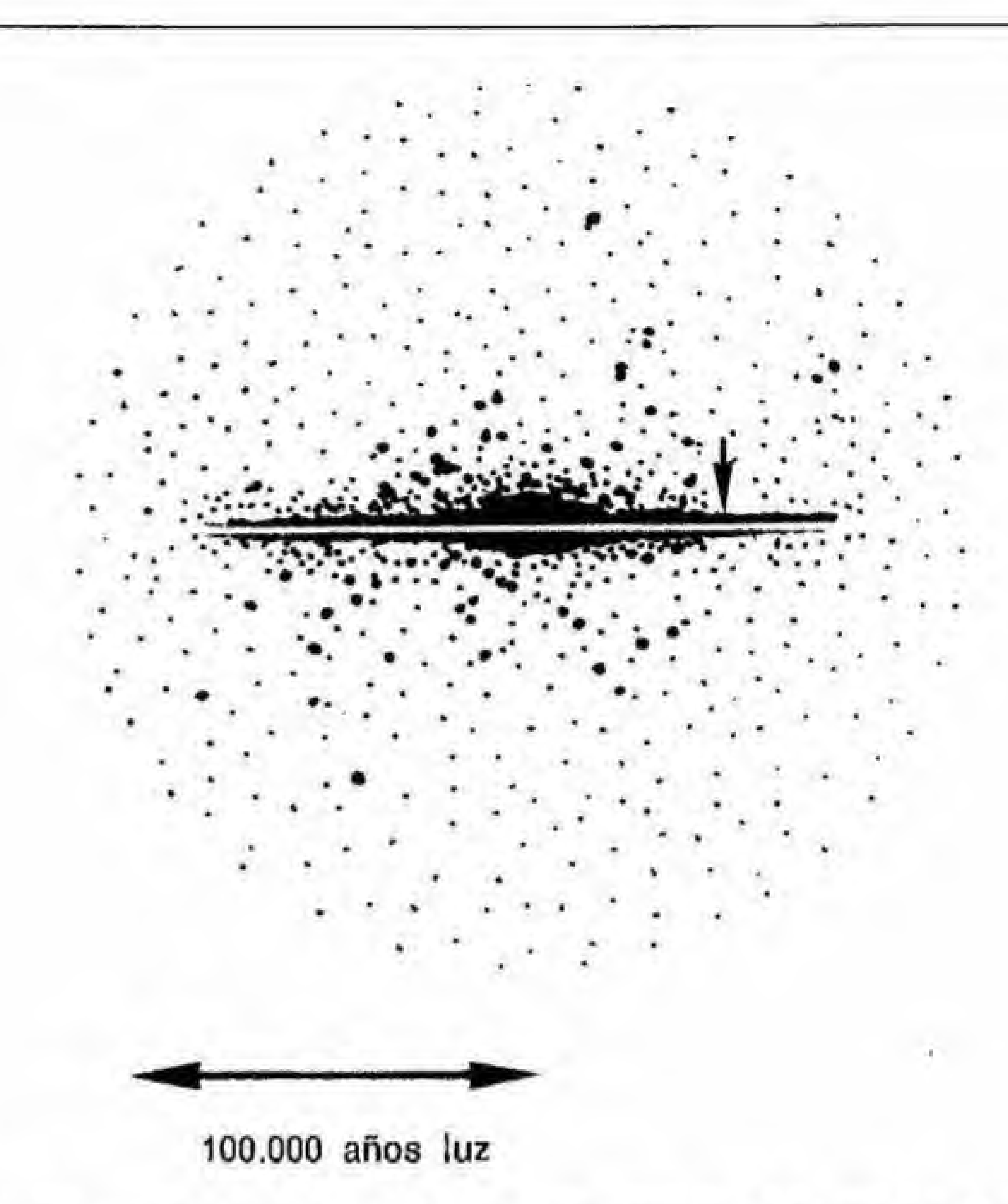


Fig. 12-3. Estructura esquemática de la galaxia Vía Láctea. La mayoría de estrellas están situadas en un disco plano que vemos de lado en el dibujo. La flecha señala la situación del Sol, y la banda central clara representa las masas absorbentes de polvo. Los cúmulos globulares (puntos gruesos) y las estrellas muy viejas (dibujadas en la figura como puntitos) constituyen el halo de la Vía Láctea. Las estrellas del halo se formaron hace mucho tiempo. Actualmente sólo nacen estrellas en las proximidades inmediatas del plano central recubierto de masas de polvo.

elementos pesados. También allí sólo unos cuantos porcientos pertenecen a los elementos más pesados que el helio, pero nos proporcionan pistas importantes para descifrar la historia de la Vía Láctea. El hidrógeno y el helio están presentes desde el origen del Universo. Son por así decirlo un don del cielo. En cambio los elementos más pesados tienen que haberse creado más tarde, en las estrellas y en las explosiones de supernovas. Las diferencias químicas entre las estrellas del halo y las del disco están relacionadas, pues, con las reacciones nucleares de las estrellas.

Actualmente se cree comprender la regularidad de las estructuras de nuestra galaxia. Para ello debemos repasar primero una lección de nuestro curso escolar de física.

MOMENTO CINÉTICO Y NUBES EN COLAPSO

La descripción del mundo físico se simplifica mucho gracias a unas cuantas "leyes de conservación". Son leyes que se utilizan continuamente en la vida sin tener exacta conciencia de ellas. Existe la ley de la conservación de la masa, que recordamos de la escuela, y la de la conservación de la energía. Las dos las utilizamos en la vida cotidiana. Somos en cambio menos conscientes de que el momento cinético, o sea, el impulso giratorio, de un cuerpo en rotación no puede desaparecer si nada lo perturba. Todos conocemos, sin embargo, una aplicación bonita de la ley. Cuando una patinadora sobre hielo hace una pirueta girando sobre sí, primero gira lentamente con los brazos extendidos. Pero basta que doble los brazos por el codo para que gire a mayor velocidad sin más esfuerzo por su parte. Esto se debe a la conservación del momento cinético. La ley resulta más clara, pero menos encantadora cuando en lugar de una patinadora sobre hielo contemplamos una nube en rotación. Esta nube podría dar una vuelta sobre sí misma en diez millones de años. Pero si se contrae y reduce, por ejemplo, su diámetro a una décima parte del valor original, girará cien veces más deprisa, o sea, que completará en cien mil años una vuelta. Podemos decir *grosso modo*: el número de revoluciones por unidad de tiempo multiplicado por la superficie de la nube (que supondremos aproximadamente esférica) da siempre el mismo número durante el colapso. Cuando la nube disminuye de tamaño, gira más deprisa.

Pero entonces la fuerza centrífuga aumenta, y en el ecuador de la nube en rotación se contrapone a la gravedad. La nube al colapsarse se aplana. Este hecho tiene consecuencias no sólo para el nacimiento de una estrella sola, sino también para el origen de nuestra Vía Láctea.

SIGUIENDO LA PISTA A LA HISTORIA DE LA VÍA LÁCTEA

Ignoramos de dónde procede. La materia creada en el principio del Universo y que desde entonces estaba en expansión debió en algún momento formar por condensación una nube parcial de unos cien mil millones de masas solares. Como toda la materia, también este gas extraído de la masa en movimiento turbulento recibió un movimiento de rotación. Se contrajo lentamente y alcanzó una densidad suficiente para que pudieran formarse en él nubes parciales que se dividieron luego en nubes de gas más pequeñas y en continuo proceso de condensación. Se crearon las primeras estrellas, que estaban compuestas únicamente de hidrógeno y de helio y quemaban su hidrógeno según la cadena protón-protón. Pero pronto las estrellas de más masa agotaron su reserva nuclear y explotaron en forma de supernovas. Enriquecieron entonces las masas gaseosas con elementos más pesados que el helio. Todo esto sucedía mientras la entera nube galáctica conservaba una forma casi esférica (véase fig. 12-4 [a]). Esto explica que encontremos en el halo las estrellas más viejas de nuestra galaxia y cúmulos estelares muy viejos. Las estrellas del halo nacieron primero, mucho antes de que la Vía Láctea se convirtiera en un disco, mucho antes de que naciera el Sol. La presencia de elementos pesados en estas estrellas es muy reducida, pues se formaron con materia poco enriquecida con átomos creados en reacciones nucleares dentro de otras estrellas.

Pero la evolución siguió su curso. El gas interestelar se enriqueció continuamente con elementos superiores. Se condensó sobre núcleos de condensación escapados de estrellas evolucionadas y formó granos de polvo. Pronto el movimiento de giro se hizo apreciable. Las masas de gas y polvo en continua condensación formaron un cuerpo cada vez más plano, dejando detrás suyo las estrellas y los cúmulos estelares ya formados en el halo esférico (véase figura 12-4 [b]). Las nuevas estrellas se formaban ahora en una lente cada vez más plana a partir de materia cada vez más enriquecida en elementos pesados. La mayor parte del gas se gastó cuando se formaron las últimas estrellas en el disco final. Acababa así la primera fase de la génesis estelar.

Este cuadro esclarece los rasgos esenciales de nuestra galaxia: las estrellas más viejas están en el halo de simetría esférica, pobre en elementos pesados. Las estrellas más jóvenes nacen actualmente en un disco delgado, porque sólo allí queda gas disponible.

El momento cinético que nuestra galaxia heredó de la nube original es responsable de que nuestro sistema estelar sea un disco. Por tanto, también es responsable de que podamos ver en el cielo la banda de la Vía Láctea.

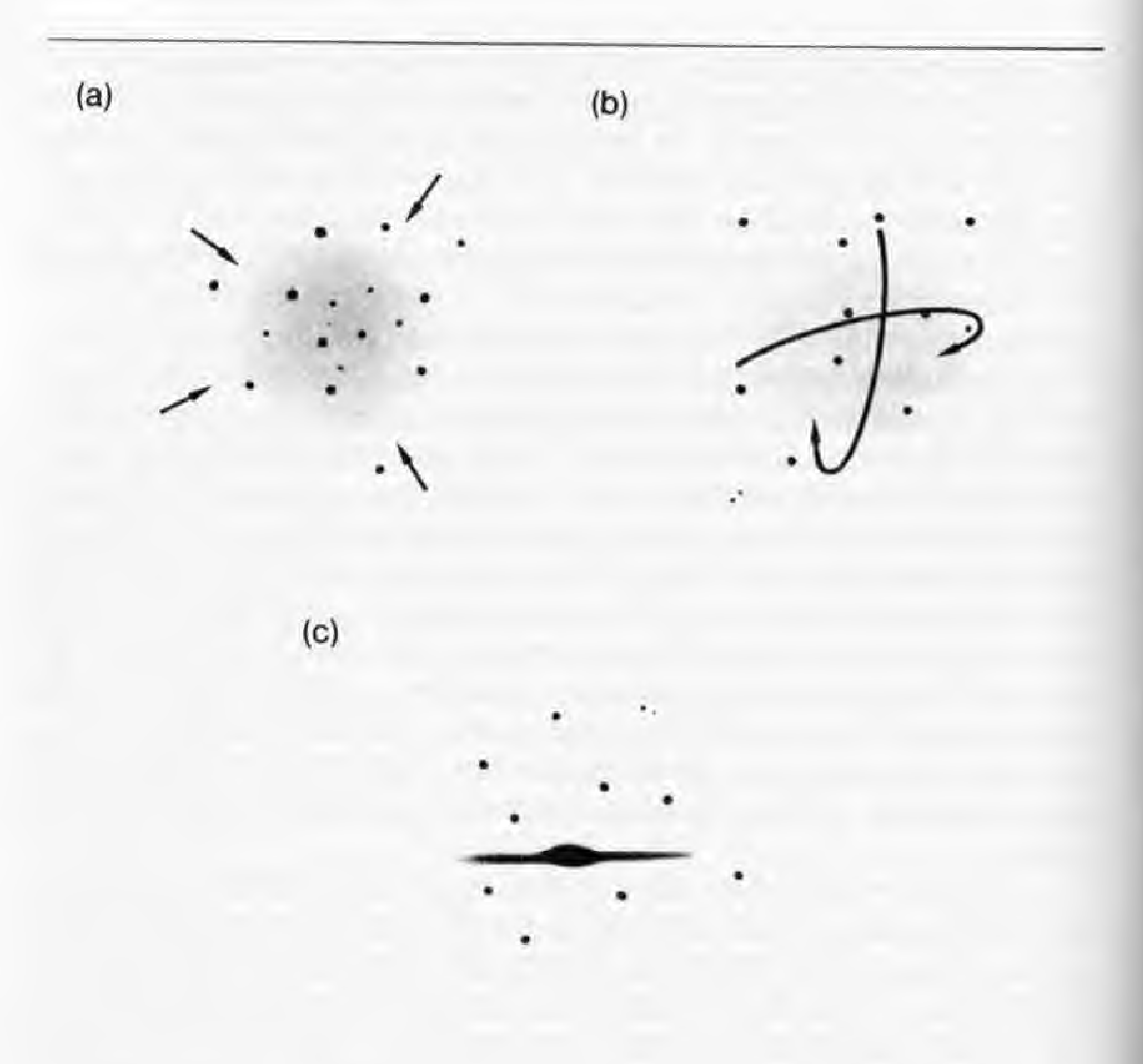


Fig. 12-4. Esquema de la formación de la Vía Láctea. Hace unos 10.000 millones de años una nube parcial se separó de la materia original del Universo, y empezó a contraerse impulsada por su propia gravedad. Al aumentar la densidad se formaron las primeras estrellas (puntos) y los cúmulos estelares globulares (puntos gruesos [a]). Todavía hoy llenan el espacio esférico donde nacieron, y trazan órbitas alrededor del centro como la dibujada en (b). Las estrellas de gran masa completan su evolución rápidamente y devuelven al gas materia enriquecida con elementos más pesados; de este modo pueden formarse estrellas enriquecidas con elementos pesados. Al aumentar la condensación del gas, la rotación empieza a notarse y el gas forma un disco. En el disco nacen nuevas estrellas; nacen incluso estrellas hoy en día (c). Este esquema esclarece la estructura espacial de nuestro sistema y la diferencia química entre los objetos del halo y las estrellas del disco.

¿QUÉ DESENCADENA LA FORMACIÓN DE ESTRELLAS?

¿Por qué se condensa y forma estrellas hoy en día la materia interestelar de determinadas regiones del disco de nuestra galaxia? ¿Por qué no se forman estrellas en otros lugares de nuestro sistema? La Vía Láctea vista desde las profundidades del espacio tendría el mismo aspecto que la nebulosa de Andrómeda: un disco plano con una clara estructura espiral (véase fig. 0-1). Otros sistemas estelares muestran con mucha mayor claridad la estructura espiral (véase figura 0-4). Los brazos espirales destacan en las fotografías de galaxias lejanas porque el hidrógeno ionizado que contienen brilla por excitación. Pero el hidrógeno se ioniza por la acción de estrellas brillantes y de gran masa de la secuencia principal, como sabemos por la nebulosa de Orión. Por tanto, los brazos espirales son los lugares donde hay estrellas jóvenes, y donde en consecuencia acaban de nacer estrellas. También en la Vía Láctea las estrellas jóvenes se alinean a lo largo de los brazos de la espiral.

Por otra parte, las investigaciones radioastronómicas permiten estudiar con mucho detalle la distribución del gas interestelar en la Vía Láctea, y se comprueba que a lo largo de los brazos espirales el gas es más denso que en el resto del disco. Por tanto, los brazos son los lugares de más densidad gaseosa, y también los lugares donde están situadas las estrellas jóvenes. Pregunta: ¿A qué se debe la estructura espiral, como de girándula, que presentan las galaxias?

Los brazos espirales han planteado durante mucho tiempo dificultades especiales de comprensión. Todavía hoy no se ha esclarecido definitivamente su forma. Las galaxias giran. Su velocidad de rotación puede medirse (véase Apéndice A) y se sabe que no giran como cuerpos rígidos. La velocidad de rotación disminuye hacia fuera, y las partes interiores de las galaxias dan vueltas más deprisa.

A primera vista no resulta muy extraño que se observe una estructura espiral en las galaxias. También al remover una mezcla de café con leche en una taza obtenemos una estructura espiral, porque el líquido gira a velocidad distinta según sea su distancia al centro. Cabe esperar pues que una galaxia de estructura inicial cualquiera, transcurrido un tiempo, se volverá espiral debido a las distintas velocidades de rotación de sus partes.

Carl Friedrich von Weizsäcker dijo en cierta ocasión que la Vía Láctea acabaría siendo espiral aunque al principio tuviera forma de vaca. Hace unos años investigamos en Gotinga la vaca galáctica de

Weizsäcker; nos ayudó Alfred Behr, que hasta hace poco profesaba en Hamburgo. El resultado está representado en la figura 12-5. Antes de que el grueso de las estrellas haya completado siquiera una vuelta alrededor del centro, la galaxia vaca se ha transformado en una magnífica galaxia espiral. Por desgracia la historia tiene un fallo.

Para formar una estructura espiral a partir de una estructura inicial arbitraria se necesitan menos de cien millones de años. Pero nuestro sistema galáctico es cien veces más viejo. La estructura original debió de evolucionar mucho más durante este intervalo. Las espirales tuvieron que devanarse más de cien veces alrededor del centro, como los surcos de un disco de larga duración. Pero no es



Fig. 12-5. La Vía Láctea no gira rígidamente. Por ello al cabo de 100 millones de años una estructura inicial cualquiera habrá dado lugar a una forma espiral. Por desgracia, las espirales de la galaxia no pueden explicarse de este modo.

esto lo que observamos. Los brazos espirales de una galaxia, como vemos en la figura 0-4, no estan finamente desarrollados, por tanto no pueden ser el resto de una estructura inicial. Ninguno de los sistemas espirales observados presenta espirales muy finas, por tanto debemos suponer que las espirales no evolucionan. Sin embargo, están formadas por estrellas y gas que participan en el movimiento rotacional de devanado. ¿Cómo resolvemos este dilema?

Sólo hay una salida. Debemos renunciar a creer que las espirales estén formadas siempre por la misma materia y suponer en cambio que las estrellas y el gas fluyen a través de las espirales. Las estrellas y el gas participan en el movimiento de rotación, pero las espirales en sí constituyen únicamente un estado especial a través del cual pasan de modo transitorio las estrellas y el gas.

Conocemos un fenómeno semejante de la vida diaria. Una llama de gas no está formada continuamente por la misma materia. Es sólo un estado especial de una corriente de gas, que lo atraviesa y en el cual las moléculas gaseosas experimentan una determinada reacción química. También los brazos espirales son regiones del disco galáctico rotatorio en las que el flujo continuo de estrellas y de gas asume un estado especial. Este estado se mantiene gracias a las propiedades gravitatorias de la materia que forma la entera galaxia. Me explicaré.

¿QUÉ SON LOS BRAZOS ESPIRALES?

Los procesos de flujo en la naturaleza a menudo crean formas regulares. La interacción del viento y del agua crea el oleaje que rompe contra la playa con un ritmo regular. En las playas planas de arena el fondo del mar presenta ondulaciones regulares. También mezclando cuidadosamente fluidos de densidad y temperatura distintas se forman a menudo estructuras. El cacao al enfriarse muestra en su superficie dibujos regulares.

También muestran tendencia a construir estructuras las estrellas que giran en un disco galáctico alrededor de su centro común, guiadas por la interacción de las fuerzas centrífugas y de atracción.

Imaginemos un gran número de estrellas ordenadas en un disco en rotación. En cada punto del disco la fuerza centrífuga y la gravedad están en equilibrio. Pero en general este equilibrio no es estable. Si en un punto aumenta casualmente la densidad de estrellas, éstas se atraerán con más fuerza, de modo semejante a la ines-

tabilidad que provoca la formación de estrellas en un gas interestelar. Pero ahora la fuerza centrífuga es importante y por ello el proceso se complica. La solución puede simularse en un computador. La figura 12-6 representa el movimiento de 200.000 estrellas en un disco rotatorio, calculado en un computador. Se forman de modo totalmente espontáneo filamentos largos y espirales de gran densidad estelar. Las estrellas forman brazos espirales. Sin embargo, los brazos no se enrollan, porque no están formados siempre por las mismas estrellas. Están *atravesados* por un flujo de estrellas. Cuando las estrellas, siguiendo sus órbitas de tipo circular, entran en un brazo espiral, se aprietan más unas con otras. Cuando salen del brazo, aumenta su separación. Por tanto, los brazos espirales son lugares donde las estrellas se acercan más unas a otras, del mismo modo que la llama es donde reaccionan las moléculas de un gas.

Los brazos espirales son lugares donde la densidad estelar es algo mayor que en el resto del disco. Por clara que parezca la figura 12-6, en una galaxia auténtica estas condensaciones son tan reducidas que no podrían observarse. Pero la materia interestelar que participa en el movimiento de rotación junto con las estrellas, se condensa también con ellas cuando pasa por un brazo espiral. Este aumento de la densidad proporciona las condiciones necesarias para el nacimiento de estrellas. Las estrellas nacen pues en el brazo espiral. Entre ellas hay estrellas de gran masa, brillantes y azules que excitan el gas circundante y lo hacen brillar. El aspecto espectacular de los brazos espirales no se debe a la condensación de estrellas sino a las nubes de hidrógeno brillante.

Conocemos ya la galaxia de los Perros de Caza, que aparece en la figura 0-4. Esta galaxia nos da información adicional sobre la formación de estrellas en los brazos espirales. Vemos este sistema muy desde fuera, brillando débilmente entre las estrellas más próximas de nuestra propia galaxia. Su luz ha tardado doce millones de años en llegar a nuestros telescopios. Nosotros observamos esta galaxia, por así decirlo, desde arriba, es decir, perpendicularmente a su disco, y los brazos espirales destacan con gran belleza.

FORMACIÓN DE ESTRELLAS EN LA GALAXIA DE LOS PERROS DE CAZA

Nos llegan ondas de radio de esta galaxia. Electrones de gran velocidad impulsados seguramente por antiguas explosiones de su-

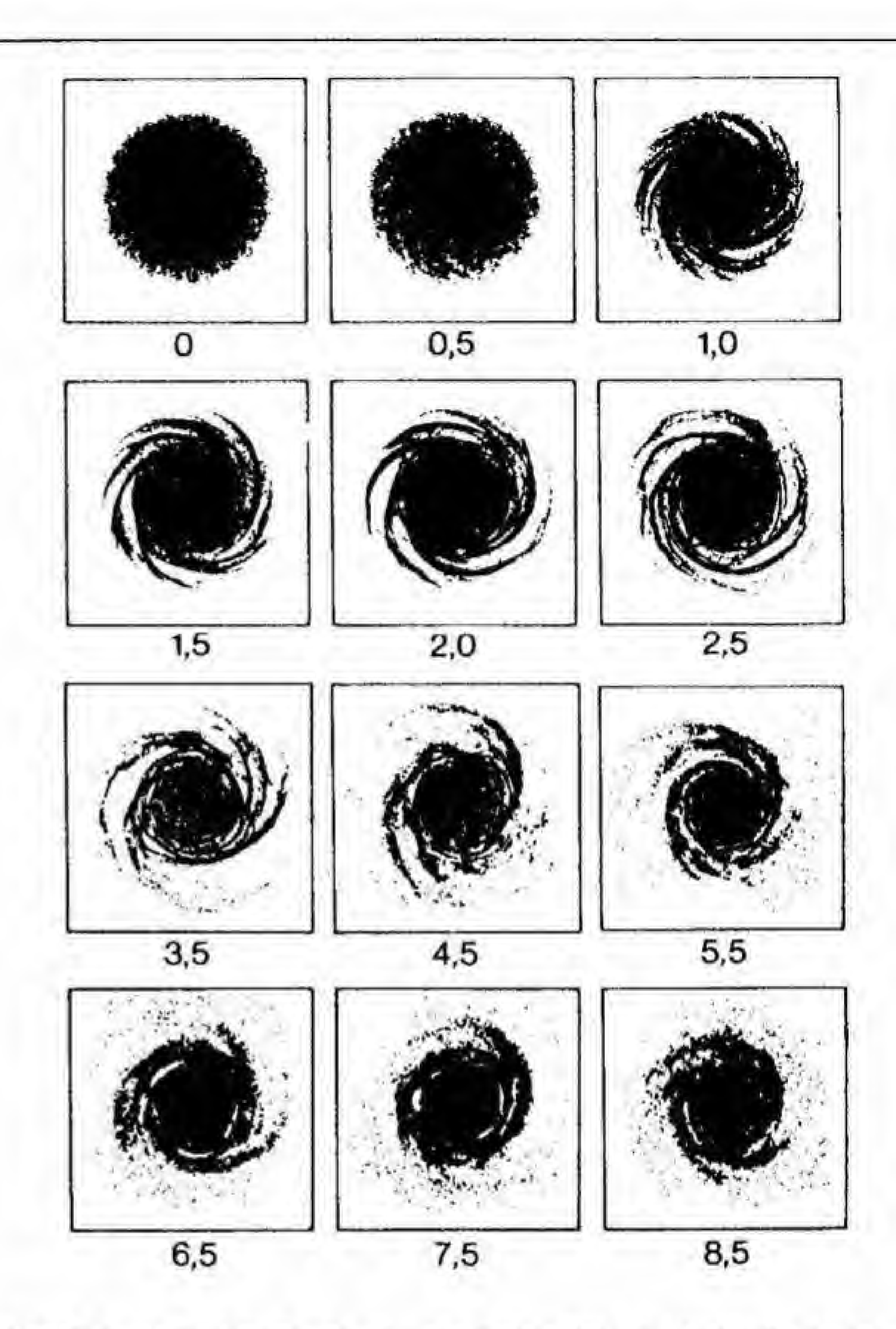


Fig. 12-6. Modelo simplificado de computador del movimiento de las estrellas en nuestra galaxia. Alrededor del centro de un disco plano, que aquí vemos desde arriba, se mueven 200.000 estrellas. Los números de cada recuadro indican el tiempo transcurrido desde la distribución inicial del primer recuadro. La unidad utilizada es el tiempo medio necesario para una revolución. Por tanto, el tiempo transcurrido entre el primer y el tercer recuadro es exactamente el necesario para que la Vía Láctea dé una vuelta sobre sí misma. Pronto se forma una estructura espiral. En el brazo espiral superior de los dibujos correspondientes a las épocas 4,5 y 5,5 puede comprobarse que las espirales constituyen lugares de paso, es decir, que en cada momento están formadas por estrellas distintas. Puede verse también que el brazo del recuadro siguiente es un producto del anterior. Entre los dos recuadros el brazo ha girado poco. En cambio, las estrellas en este período de tiempo han podido dar una vuelta entera alrededor del centro. Llevó a cabo el cálculo representado aquí el astrónomo Frank Hohl, del NASA Langley Center en Hampton, Virginia, EE.UU.

pernova atraviesan el espacio del sistema y emiten ondas de radio. Sensibles radiotelescopios las han captado. Se puede incluso distinguir qué parte de la galaxia emite más ondas y qué parte menos. En el año 1971, los radioastrónomos Donald Mathewson, Piet van der Kruit y Wim Brouw crearon en Holanda una "radioimagen" de esta galaxia (véase fig. 12-7). La luminosidad de la imagen reproduce la intensidad de la radiación. Cuanto más brillante es un punto, más intensas son las ondas de radio. El radiotelescopio no ve con tanta acuidad como el telescopio óptico, pero la estructura espiral se reconoce fácilmente. Los brazos espirales no brillan pues únicamente con luz visible, sino que emiten también ondas de radio.

¿A qué se debe que en una galaxia los electrones de una región envíen más ondas de radio que los de otra? Se debe al mecanismo causante de esta radiación. No entraremos aquí en el tema. Nos basta ahora saber que en las regiones donde el gas interestelar tiene una mayor densidad, la emisión de radio es mayor. La radioimagen de la galaxia de los Perros de Caza demuestra que en los brazos espirales no sólo están las estrellas más apretadas, sino que el gas interestelar tiene también una densidad mayor.

Pero la nebulosa de los Perros de Caza explica más cosas. Una comparación más precisa permite descubrir que las regiones de mayor emisión de radio no coinciden exactamente con los brazos espirales visibles (véase fig. 12-8). La densidad más alta del gas interestelar se da más hacia la cara interior de los brazos curvos de la espiral. ¿Qué significa esto? La galaxia en rotación atraviesa los brazos espirales. Las estrellas y con ellas la materia interestelar se desplazan a través del brazo espiral entrando por la cara interior del brazo curvado y saliendo más tarde por la cara exterior. Si comparamos el brazo espiral visible debido a las estrellas de nueva formación con el brazo espiral de radio que nos indica donde se comprime el gas interestelar, deducimos el siguiente cuadro.

Las estrellas y la materia interestelar que giran conjuntamente en la galaxia (véase fig. 12-9) se aproximan a un brazo espiral. Las estrellas se acercan unas a otras y el gas se condensa, dándose así las condiciones para que nazcan estrellas. Se forman nubes parciales que entran en colapso. Nacen las primeras protoestrellas. Al cabo de un tiempo las estrellas y la materia interestelar abandonan la zona de mayor densidad que forma el brazo espiral observado en el dominio de radio. Pronto todo queda como antes. Pero no todo; las nubes que durante este tiempo iniciaron su colapso lo continúan; la formación de estrellas desencadenada por la transitoria



Fig. 12-7. Imagen de radio de la galaxia de la figura 0-4. Esta imagen trazada por computador nos muestra la galaxia tal como aparecería ante nuestros ojos si éstos fueran sensibles a las emisiones de radio de 21 cm de longitud de onda y pudieran "ver" tan bien como el gran radiotelescopio de Westerbork, en Holanda. La radiación de esta longitud de onda llega principalmente de zonas donde el gas interestelar tiene una densidad elevada. La imagen de radio nos indica, por tanto, que el gas de esta galaxia tiene casi la misma estructura espiral que la distribución de estrellas jóvenes. (Fotografía: Sterrewacht Leiden.)



Fig. 12-8. Al superponer la imagen óptica de la galaxia de los Lebreles con los lugares de máxima emisión de radio (indicados aquí esquemáticamente por líneas blancas), vemos que los brazos espirales con máxima densidad de gas y los brazos espirales de las estrellas jóvenes no coinciden exactamente. Por tanto, hay que distinguir entre brazos de radio, o de gas denso, y brazos visibles.

condensación sigue su curso. Al cabo de un tiempo las protoestrellas han formado las primeras estrellas de gran masa. Su luz brillante y azul excita y hace brillar las masas vecinas de gas. Las estrellas de reciente formación crean el brazo espiral observable en luz visible.

Por tanto, primero entra la materia en el brazo de densidad alta. Allí se desencadena el proceso de formación estelar. Al cabo de un tiempo están en marcha las primeras estrellas y el brazo visible se pone a brillar Sabemos la velocidad con que se mueven las estrellas y el gas en la galaxia de los Perros de Caza y podemos

medir la distancia de los dos brazos espirales desplazados uno en relación a otro, por lo que podemos calcular el tiempo transcurrido hasta que la condensación del gas interestelar hace brillar las primeras estrellas: son unos seis millones de años. Por tanto, en cada nube

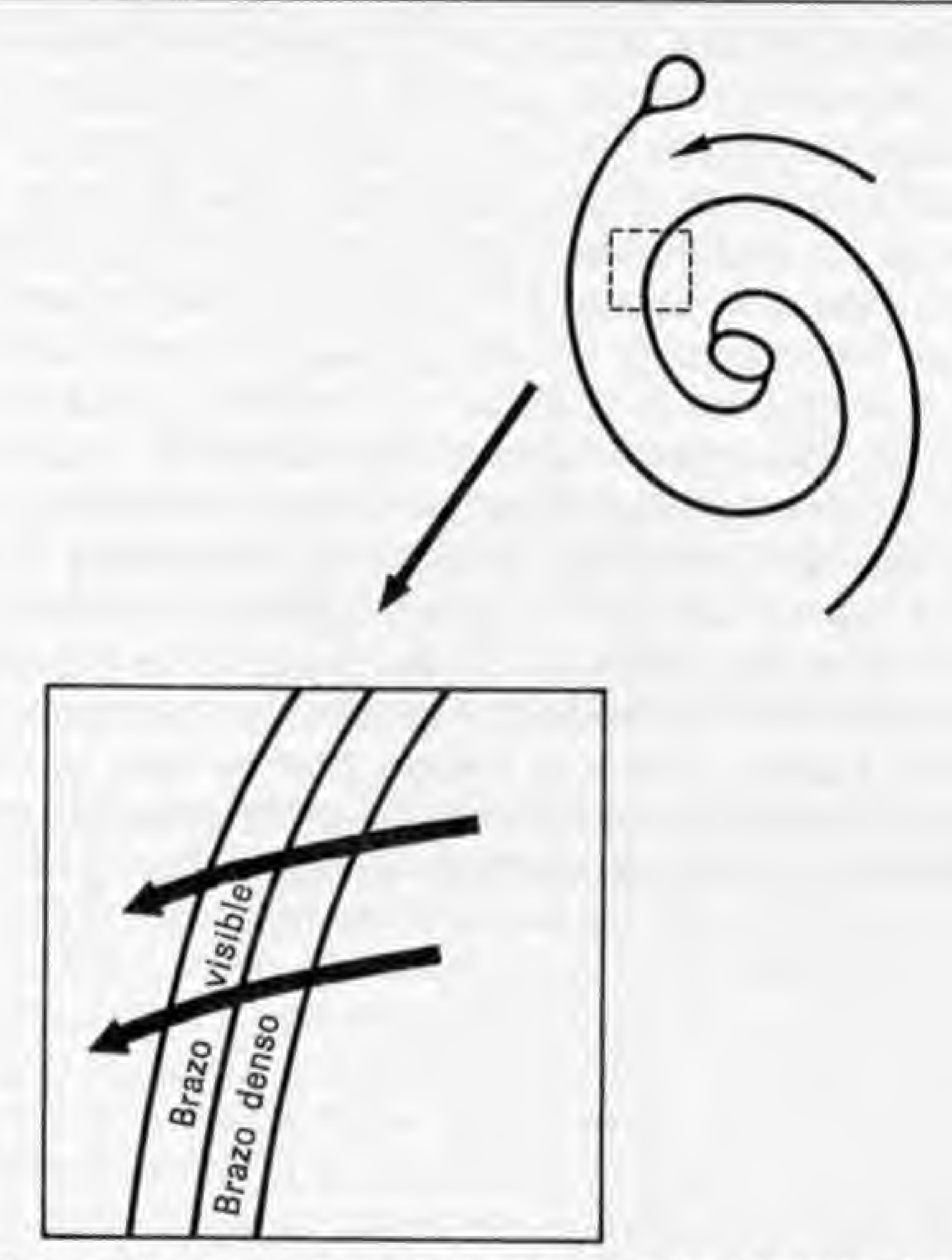


Fig. 12-9. Formación de estrellas en la galaxia de los Lebreles. Arriba, a la derecha, tenemos la imagen esquemática de la galaxia de la figura 0-4. El cuadrado de trazos está ampliado a la izquierda. La materia de la galaxia, que gira en la imagen en dirección contraria a las agujas del reloj, atraviesa primero el brazo de gas denso (brazo de radio). El gas interestelar se comprime y empieza la formación de estrellas. Al cabo de un tiempo han aparecido las primeras estrellas jóvenes que iluminan las masas vecinas de gas, las cuales emiten con luz visible (brazo visible). En el intervalo entre la condensación y el final de la formación estelar el gas se ha desplazado; por tanto, el brazo de radio y el brazo visible no coinciden. Esto explica la diferencia observada y representada en la figura 12-8 entre los brazos de radio y los brazos visibles de esta galaxia. El movimiento de la materia está indicado por las flechas curvadas.

individual durante los últimos 500.000 años de este intervalo tiene lugar un proceso como el descrito por los cálculos de Larson. Han de transcurrir cinco millones y medio de años para que de la materia interestelar se forme la nube con la que Larson inició sus cálculos.

Las estrellas de gran masa finalizan su vida antes de que hayan podido cubrir una parte apreciable de la trayectoria que les haría dar una vuelta completa alrededor del punto medio de la galaxia. Devuelven entonces la mayor parte de su materia al gas interestelar y se convierten en enanas blancas o explotan en forma de supernovas. La materia devuelta al gas interestelar, que ahora se enriquece con átomos de los elementos pesados creados en las estrellas, quedará a disposición del proceso de formación estelar cuando pase de nuevo por un brazo espiral. Queda excluida de este ciclo la materia sobrante que al final de la vida de una estrella queda en forma de astro compacto, de enana blanca o de estrella de neutrones.

En otro tiempo, mucho después de que se hubiesen formado las estrellas del halo, también la materia de nuestro Sol pasó en forma de gas interestelar por un brazo espiral, y a consecuencia de ello nacieron muchas estrellas. Las hermanas más pesadas del Sol se apagaron de nuevo hace mucho tiempo, las hermanas compuestas de menos masas, como el mismo Sol, se han ido separando desde entonces unas de otras a causa de la rotación irregular de nuestra galaxia, y se han perdido en la distancia.

XIII. LOS PLANETAS Y SUS HABITANTES

El astrónomo puede saber si la Luna está habitada con la misma seguridad con que sabe quién era su padre, pero no con la seguridad con que sabe quién fue su madre.

Georg Christoph Lichtenberg, 1742-1799

El momento cinético obliga a la formación estelar a seguir un curso algo distinto del que acabamos de describir en el último capítulo. Las estrellas y la materia interestelar giran alrededor del punto central de la Vía Láctea. Además, cada nube parcial gira alrededor de su propio centro, y este movimiento giratorio se mantiene, incluso se refuerza, cuando las nubes de gas y de polvo interestelar se contraen para formar estrellas. Esto tiene consecuencias decisivas. La condensación acelera la rotación, y la fuerza centrífuga aumenta. Esta fuerza actúa en el ecuador de la nube contraponiéndose a la gravedad. La nube colapsante se aplana y sólo puede reposar formando un disco rotatorio, en lugar de una bella protoestrella esférica como en los cálculos de Larson (véase fig. 13-1). Parece como si todo siguiera un curso distinto al imaginado en el capítulo anterior.

Nuestro sistema planetario demuestra que la rotación de la materia original jugó un papel importante en la formación del Sol. Los planetas se mueven alrededor del Sol en el mismo sentido, sus órbitas están situadas casi en el mismo plano, como si su origen hubiese sido realmente un disco plano y como si todavía reprodujeran la rotación de este disco. Hay todavía otro indicio. En nuestro sistema solar casi toda la masa está concentrada en el astro central, el Sol,

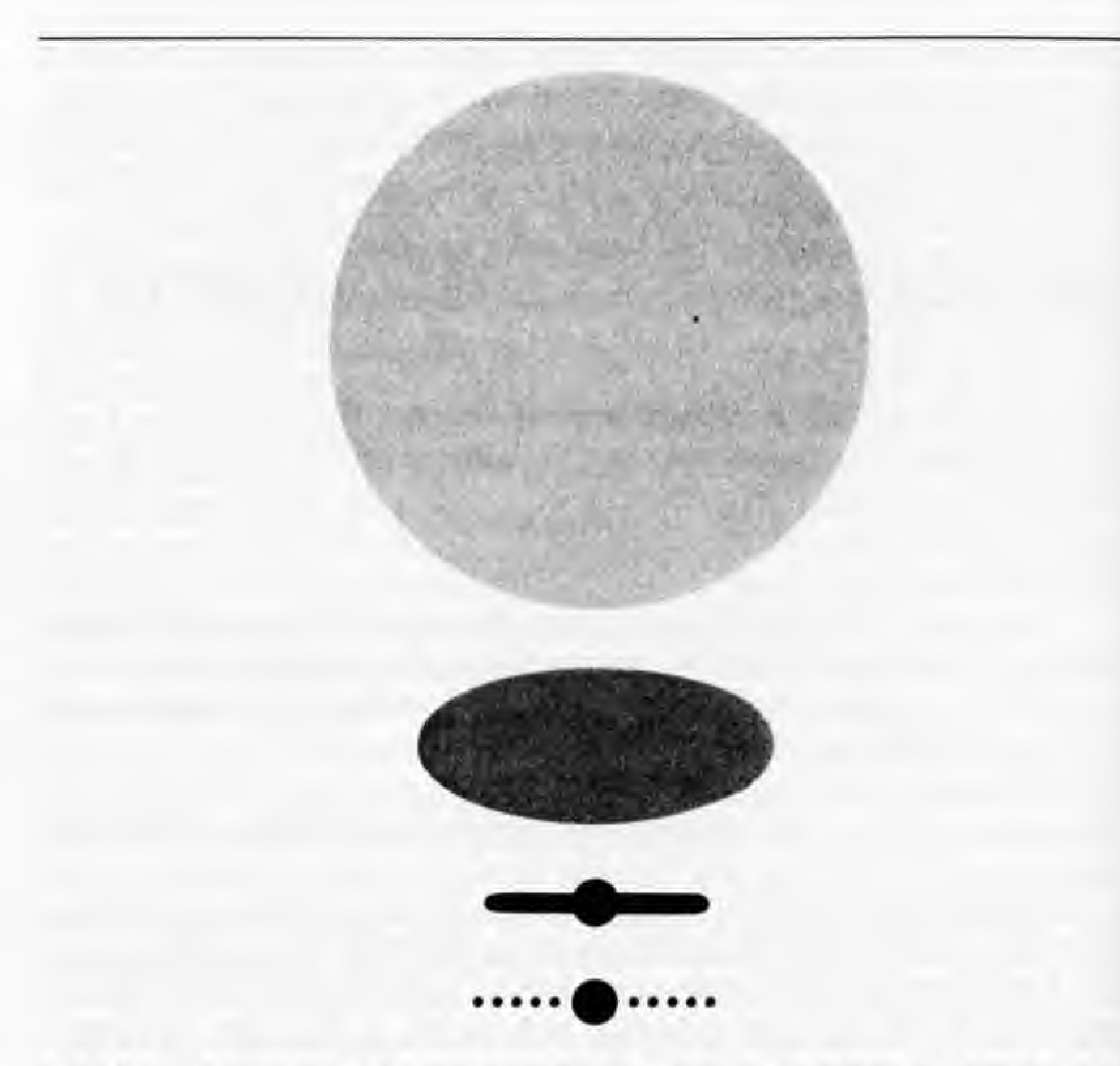


Fig. 13-1. Esquema de la formación de nuestro sistema planetario. Una parte de una nube de gas interestelar se separa de ella y empieza a contraerse. A continuación, el cuerpo se aplana porque la fuerza centrífuga impide en el plano ecuatorial el movimiento hacia el interior Se forma un disco plano, en cuyo centro nace el Sol. En el disco plano que rodea al Sol la materia se condensa y forma planetas, que una vez formados giran en el plano del disco primitivo. El dibujo no respeta las escalas. Por sencillo que parezca este proceso, hasta el momento no se ha podido esclarecer de modo definitivo en todos sus detalles.

mientras que los planetas sólo poseen 13 milésimas partes de la masa; en cambio, él solo apenas tiene momento cinético. El momento cinético se oculta en el movimiento orbital de los cuerpos planetarios. Parece como si al entrar en colapso la nube interestelar, la materia hubiese actuado muy sabiamente, redistribuyendo el momento cinético que impedía formar una estrella. Una pequeña parte

de la masa original se quedó con casi todo el momento cinético y formó los planetas, dejando a la mayor parte de las masa liberada de casi todo el momento cinético para poder formar un astro central al estilo de Larson.

EL PROBLEMA DE LA FORMACIÓN DE LOS PLANETAS EN EL COMPUTADOR

El matemático francés Laplace y el filósofo alemán Immanuel Kant supusieron ya que el Sol y los planetas se habían formado a partir de una nebulosa primigenia en rotación. Hoy podemos atrevernos a reproducir estos procesos en un computador electrónico. Voy a basar lo que sigue en los resultados de estos cálculos obtenidos por el astrofísico californiano Peter Bodenheimer y por Werner Tscharnuter, en parte separados y en parte conjuntamente en Munich. Los autores querían esclarecer el nacimiento del Sol y de los planetas, pero el resultado fue muy distinto.

Uno se da cuenta de lo fácil que resulta simular en el computador procesos de simetría esférica, cuando pasa al siguiente problema de dificultad creciente. Cuando hay simetría esférica en cada momento todo depende únicamente de la distancia al centro. Cuando en el modelo Larson se calienta una partícula material, se calienta simultáneamente toda la materia situada a la misma distancia del centro, es decir, toda la materia situada sobre la misma superficie esférica que la partícula. Cuando la materia no está en rotación, la simetría esférica es una buena aproximación, porque todas las partículas materiales que participan en el colapso tienen el mismo destino, sea cual fuere la dirección de donde provienen.

En cambio, la rotación perturba la simetría. Las partículas que llegan procedentes del polo captan fuerzas distintas de las que llegan en una dirección ecuatorial. Se ha acabado la simetría esférica. Y esto no significa que estemos ante el caso más complicado. Siempre existe un cierto grado de simetría. Por ejemplo, en el plano ecuatorial las partículas se aproximan al centro en órbitas procedentes de direcciones distintas, pero las partículas de todas estas órbitas tienen el mismo destino. Un proceso de este tipo tiene *simetría axial.* Los procesos de simetría axial, aunque no son los peores, resultan mucho más difíciles de tratar con el computador. Pero también pueden dominarse. Bodenheimer y Tscharnuter han seguido con el computador el colapso de una nube en rotación (véase fi-

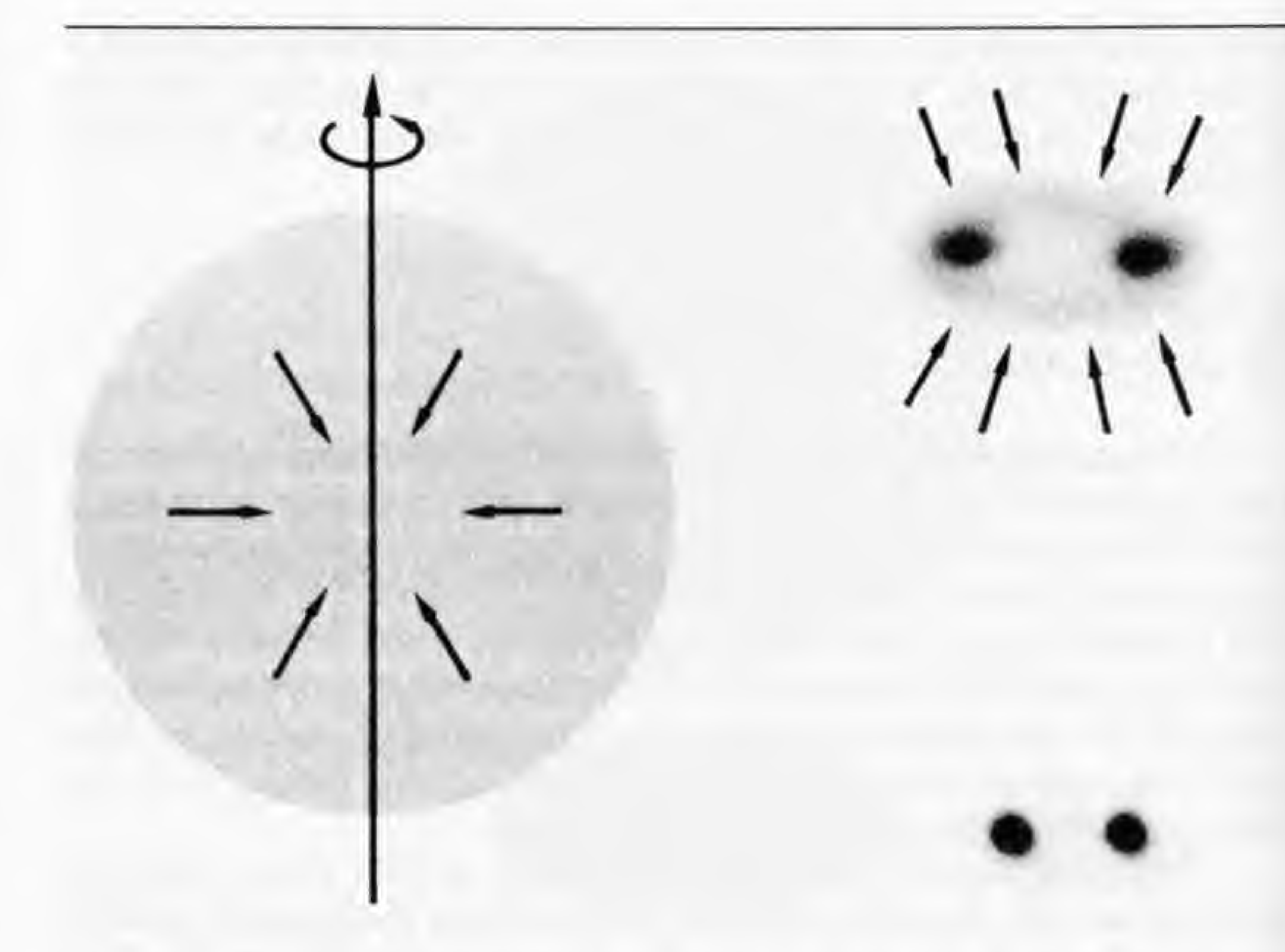


Fig. 13-2. Una nube interestelar en rotación se contrae. En el dibujo superior está indicado el eje de rotación. Al principio el gas cae uniformemente hacia el centro desde todas las direcciones, como señalan las flechas rectas. Más tarde (derecha) se forma un disco de rotación sobre el cual cae el gas procedente principalmente de la dirección polar. Empiezan a notarse los primeros indicios de un anillo, cortado perpendicularmente por el plano de este dibujo y del siguiente, de modo que sólo se perciben en ellos dos condensaciones. El mismo anillo está representado desde arriba en la figura 13-3. Este proceso, calculado en 1978 por Bodenheimer y Tscharnuter, no da origen a ninguna estrella central.

gura 13-2). Al principio todo va como había calculado Larson: la nube se contrae y forma una condensación en el centro. Pero cuanto más se contrae la nube, más empieza a notarse la fuerza centrífuga: la nube se aplana. Al final se forma un disco plano. Sólo continúa cayendo la materia próxima al eje de rotación, mientras que el gas situado en el plano ecuatorial se aproxima muy lentamente al centro y finalmente se inmoviliza. En lugar de un núcleo sobre el cual llueve materia procedente de todos los lados, tenemos ahora un disco sobre el cual se precipita únicamente materia procedente del eje. El



Fig. 13-3. La concentración anular de materia formada en la figura 13-2 aparece aquí vista desde arriba, y ampliada tres veces en relación al dibujo inferior de la figura 13-2. Al cabo de unos centenares de miles de años se descompone en dos condensaciones que pueden formar una estrella cada una, las cuales seguirán luego girando una alrededor de otra en un sistema estelar doble.

disco, cuyo radio ecuatorial es ocho veces mayor que su grosor, se extiende a gran distancia por el espacio, hasta unas 120 órbitas de Plutón, nuestro planeta más lejano. Necesita unos 300.000 años para dar una vuelta completa alrededor de su centro.

No era éste ni mucho menos el resultado esperado. El cuadro

deseado era un cuerpo que tuviera en su centro el Sol primitivo. Alrededor de este Sol hubiera interesado disponer de un disco a partir del cual pudieran formarse los planetas en el transcurso del tiempo. Sin embargo, el disco de Bodenheimer y Tscharnuter no muestra ningún cuerpo de aspecto solar en su centro; al contrario, la mayor densidad se da en un anillo situado a una distancia del centro equivalente a 17 órbitas plutónicas. En lugar de un cuerpo central se ha formado un anillo. El dibujo inferior de la figura 13-2 nos lo muestra de lado. En la figura 13-3, arriba, miramos el anillo perpendicularmente.

Si bien se piensa, este resultado no es tan extraño. ¿Por qué forma un anillo la materia del modelo, en lugar de precipitarse hacia el centro? Porque se lo impide la fuerza centrífuga. El responsable es el momento cinético de la materia. Habíamos sospechado que la naturaleza al formar el sistema solar separó la materia y el momento cinético, pues actualmente el Sol posee la materia y el momento cinético reside en los planetas. Bodenheimer y Tscharnuter dejaron en sus cálculos que cada gramo de materia conservara el momento cinético que tenía desde el principio. Pudieron entonces repetir sus cálculos suponiendo que el momento cinético se desliza a través de la materia de modo parecido quizás al calor que los cuerpos conducen. Pero entonces aparece una dificultad. Conocemos muchos mecanismos que permiten transportar el momento cinético de un lugar del disco a otro, pero ignoramos cuál es el decisivo. Unos campos magnéticos podrían liberar del impulso giratorio partes del disco, permitiendo así que la materia formara una condensación en el centro, pero también serviría para el mismo fin un movimiento turbulento con procesos de fricción.

El movimiento turbulento de fluidos y gases se cuenta todavía entre los procesos menos comprendidos de la naturaleza, aunque nos sea tan conocido. El agua que sale a gran presión de un grifo bien abierto no fluye de modo uniforme sino que cambia de modo imprevisible su complicada forma de moverse. La corriente de un torrente es otro ejemplo del movimiento turbulento e irregular de un líquido. Weizsäcker durante la última guerra había reconocido ya que la turbulencia puede jugar un importante papel en la rotación del disco que más tarde dará origen a una estrella. A fines de los años cuarenta y principios de los cincuenta un grupo de jóvenes físicos trabajó con él en Gotinga sobre este problema. Uno de ellos era Reimar Lüst, actualmente presidente de la Sociedad Max Planck, quien escribió su tesis sobre el transporte del momento cinético en los discos de gas en rotación. Tscharnuter en 1979 pudo demostrar con cálculos de computador que el disco forma un núcleo central, y por tanto una estrella, cuando el movimiento turbulento de la materia distribuye el momento cinético en el disco. Por desgracia se sabe tan poco sobre la rotación turbulenta de un disco gaseoso, que no puede predecirse cómo se lleva a cabo cuantitativamente la separación de la materia y del momento cinético.

Hemos llegado pues de momento al final. Los astrofísicos tienen que dominar primero los mecanismos del transporte del momento cinético en la materia para poder continuar progresando. Pero al parecer no son únicamente los astrofísicos quienes tienen ideas poco claras sobre qué hacer con el momento cinético en el disco en rotación; al parecer ni la misma naturaleza acaba en ocasiones de aclararse.

NACIMIENTO DE UN SISTEMA ESTELAR DOBLE

El anillo que apareció en los cálculos descritos en la sección anterior no ha dejado descansar a un grupo de científicos de nuestro Instituto. ¿Qué sucedería si la naturaleza estuviera al mismo nivel que Bodenheimer y Tscharnuter y no supiera cómo distribuir el impulso giratorio, y qué sucedería si se creara realmente un anillo así? La naturaleza no nos da ninguna pista. Nosotros nos limitamos a observar estrellas en el Universo sin descubrir ningún anillo de materia girando alrededor de un centro vacío. ¿Qué hacemos pues con el anillo?

Si se quiere seguir el proceso en el computador se tropieza con una nueva y grave dificultad. El anillo tenía por lo menos simetría axial, pero ahora pierde esta propiedad. Hay que desarrollar nuevos procedimientos de cálculo, más complicados, para recrear el proceso con un gran gasto de espacio en el computador. En los años 1977-78 nuestro Instituto tuvo la fortuna de que coincidieran en él, simultáneamente, Tscharnuter, Karl-Heinz Winkler y Harold Yorke. Se unió a ellos el joven astrofísico polaco Michal Rózyczka. Los cuatro escribieron un programa de computador y descubrieron en qué se transformaba el anillo de Bodenheimer y Tscharnuter.

La figura 13-3 ofrece el resultado. El anillo desarrolla al cabo de 10.000 años en dos puntos opuestos dos condensaciones, que aumentan de tamaño y que al cabo de 50.000 años más forman dos nubes que giran una alrededor de la otra, y de las cuales pueden

nacer dos estrellas. El computador nos ha descrito el nacimiento de un sistema estelar doble.

Quizás estos cálculos indican que la naturaleza puede seguir dos caminos. En un caso el momento cinético se conserva en la materia y después de pasar por una estructura anular nacen estrellas dobles. En el otro caso la materia y el momento cinético pueden separarse y nacen estrellas con un momento cinético reducido alrededor de las cuales trazan sus órbitas planetas de poca masa y mucho momento cinético. Si esto es cierto, debemos deducir que todas las estrellas solas tienen planetas a su alrededor.

¿ESTAMOS SOLOS?

Todavía no hemos comprendido perfectamente el camino que lleva de la nube interestelar al sistema planetario, pero no hay duda de que el momento cinético de la materia original es responsable del nacimiento de los planetas y, por tanto, de nuestra propia existencia. En este caso todas las estrellas solas estarían rodeadas de pequeños planetas que nosotros no percibimos por la gran distancia que nos separa de ellos. Pero si los planetas en órbita alrededor del Sol no son un fenómeno único, ¿dejamos quizá también nosotros, los habitantes de un planeta, de ser un fenómeno único? Quizá nuestro sistema galáctico está lleno de planetas habitados por seres vivos que ocupan una fase evolutiva similar, anterior o posterior a la nuestra. ¿Estamos solos en la galaxia o además de nosotros hay seres civilizados con los cuales podríamos llegar a comunicarnos?

EL PROYECTO OZMA Y LA EMBAJADA DE ARECIBO

En mayo de 1960, astrónomos americanos del observatorio de Greenbank, en EE.UU., dirigieron un radiotelescopio a la estrella Tau Ceti. Utilizaron una longitud de onda de 21 centímetros para investigar si de ella nos llegan emisiones de radio interpretables como señales de seres inteligentes. También estuvieron a la escucha de la estrella Épsilon Eridani. ¿Por qué escogieron precisamente estas estrellas? Son estrellas relativamente cercanas, pero no las más cercanas. La luz de la primera tarda en llegar once años, la de la segunda, doce. Son estrellas muy parecidas en temperatura, luminosidad y masa al Sol. También su edad coincide con la del Sol.

Si nuestro Sol está rodeado de planetas, uno de los cuales sostiene una civilización técnica capaz de construir radiotelescopios, ¿cabría la posibilidad de que estos dos soles tuvieran planetas con civilizaciones técnicas?

Supongamos que allí hubiera realmente seres con un desarrollo técnico semejante al nuestro. ¿Podríamos captar sus emisiones? Nosotros emitimos desde hace tiempo hacia el espacio. Poco después de 1945 se pudieron enviar impulsos de radar a la Luna y recibir el eco correspondiente. Los astronautas rumbo a la Luna y las sondas espaciales que han penetrado profundamente en nuestro sistema planetario se dirigen por señales de radio enviadas desde la Tierra. Se han enviado impulsos de radio a Venus con una antena de radar y se ha captado su eco. Imaginemos esta antena situada en el espacio exterior sobre un planeta que gira alrededor de otro Sol. En tal caso, el telescopio de 26 metros de Greenbank podría captar sus señales desde una distancia de nueve años luz. El telescopio de 100 metros de Effelsberg, en la región alemana de Eifel, podría captar esta misma emisión de radar desde una distancia de hasta treinta años luz. Pero a esta distancia hay en las cercanías del Sol hasta 350 estrellas. Si desde una de ellas se emitiera hacia la Tierra con los medios técnicos de que disponemos ahora nosotros, mis colegas y amigos Peter Mezger y Richard Wielebinski que dirigen este telescopio podrían escuchar tranquilamente sus señales.

Durante tres meses se estuvo a la escucha de las estrellas Tau Ceti y Épsilon Eridani desde Greenbank, pero no se captó ninguna señal, y el programa se interrumpió en favor de otras observaciones radioastronómicas. Así acabó el proyecto OZMA, nombrado por el país de hadas Oz. La empresa recibió también el nombre de proyecto "Enanitos Verdes" en el argot del observatorio. Los enanitos verdes no abrieron la boca.

Pero, ¿por qué iban a hacerlo? ¿Nos responsabilizamos nosotros por el intercambio interestelar de información? ¿Enviamos nosotros sistemáticamente mensajes a otras estrellas? Aparte de una emisión breve y dirigida del 16 de noviembre de 1974, no se ha hecho nada en este sentido. En aquella ocasión, el radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico, envió un mensaje de tres minutos. Esta antena puede apuntar con mucha precisión, por lo que su alcance es muy grande. ¿Pero hacia dónde había que apuntar? La emisión se envió a un cúmulo estelar de la constelación de Hércules. Las estrellas están tan apretadas que una sola emisión puede cubrir los planetas de 300.000 soles. La emisión les llegará dentro de 24.000

años. Si entonces una civilización con un radiotelescopio de tamaño suficiente está a la escucha en nuestra dirección durante los tres minutos justos que dura, recibirá el mensaje de Arecibo; es realmente inverosímil que así sea. El mensaje de Arecibo se concibió más como un acto simbólico, pues se envió al espacio al inaugurar por segunda vez el telescopio después de unas largas reformas. Para poder buscar otras civilizaciones en el Cosmos hay que escuchar sistemáticamente y los otros tienen que haber emitido también sistemáticamente.

Otros intentos no sistemáticos para informar a los demás sobre nosotros son dos placas de aluminio dorado y grabado que se colocaron en las dos sondas Pioneer 11 y 12 enviadas a Júpiter (véase fig. 13-4). Cuando hayan completado su misión en Júpiter abandonarán nuestro Sistema Solar y volarán hacia el espacio exterior. Estas placas, como el mensaje de Arecibo, contienen información sobre nuestra posición en el espacio y sobre nosotros mismos. Si en alguna ocasión seres inteligentes tienen en sus manos estas tarjetas de presentación, se enterarán de muchas cosas sobre nosotros, pero nunca podrán resolver un enigma: cómo somos por detrás.

LA LARGA TRAYECTORIA DE LA VIDA

Saber si estamos solos en el Universo o si hay vida en otras estrellas o en sus vecindades es una cuestión anterior al descubrimiento de que las estrellas fijas son soles. Nicolás de Cusa (1401-1464) y Giordano Bruno (1548-1600) ya se la plantearon. A uno de ellos no le sucedió nada, el otro tuvo que morir quemado por culpa de ella.

Vamos a planteamos la posibilidad de que exista vida en otros astros de nuestra galaxia, pero limitándonos a la vida fundada sobre una base química semejante a la vida de nuestra Tierra. Sobre todo imponemos la condición de que esta vida dependa de la existencia de agua en forma líquida. Queremos pues preguntamos si en algún planeta se ha podido desarrollar una vida parecida a la nuestra o incluso más avanzada. En cualquier caso, esta vida habrá necesitado para evolucionar tanto tiempo como la vida de la Tierra. Sabemos por los estratos de Onverwacht en el Transvaal que hace más de 3.500 millones de años existían organismos unicelulares muy desarrollados, algas azules. Se calcula que la edad de la Tierra es superior a esta cifra en 1.000 ó 1.500 millones de años. Por tanto, debemos

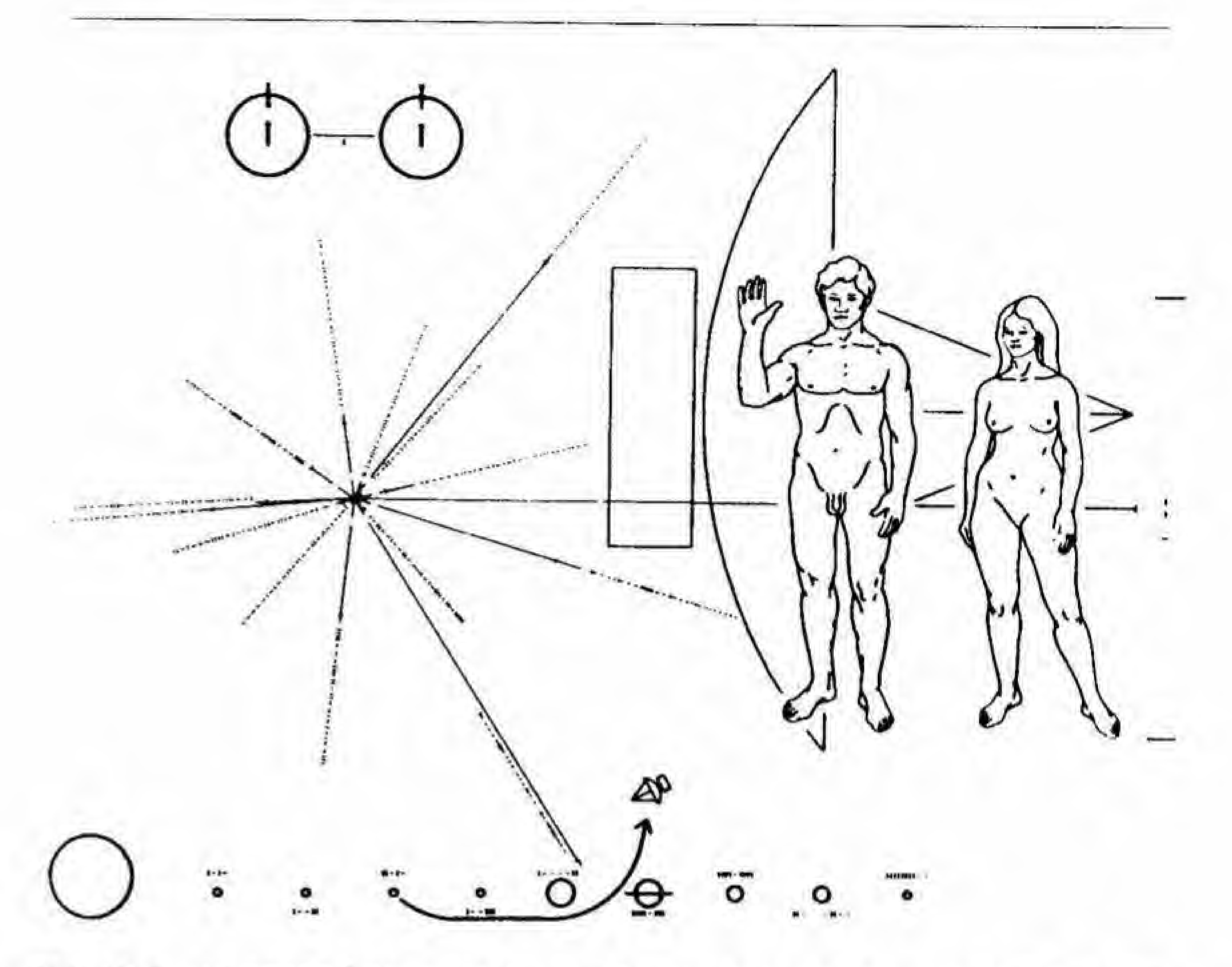


Fig. 13-4. La sonda Pioneer-Júpiter contiene una placa de aluminio dorado, una tarjeta de visita para un posible encuentro con una civilización extraterrestre. El dibujo, aparte de una información plástica sobre nosotros, ofrece en la parte izquierda nuestro domicilio en la Vía Láctea mediante las direcciones desde donde captamos los pulsares más potentes. Los períodos de los pulsares están expresados en números del sistema binario. Los pulsares pierden velocidad con el tiempo; por tanto, quienes reciban la placa podrían incluso determinar la fecha del lanzamiento de la sonda. La parte inferior ofrece más información sobre el Sol y el Sistema Solar, expresada de nuevo con números binarios.

buscar estrellas en cuyas cercanías hubo, durante por lo menos 4.000 millones de años, condiciones constantes para la evolución de seres superiores a partir de vidas primitivas.

Recordemos la historia de la vida sobre nuestro planeta. El astrónomo Heinrich Siedentopf (1906-1963) hizo una comparación muy gráfica: Imaginemos la historia de la Tierra, un intervalo de unos 5.000 millones de años, comprimido en un año: una semana de este año representativo correspondería a un intervalo de 100

millones de años reales, 160 años de evolución real se reducirían a 1 segundo. Pasó por tanto un año desde la formación del mundo y de las estrellas más viejas de nuestra galaxia hasta la formación del Sol y de la Tierra. Supongamos que en enero del segundo año se han formado los planetas, y con ellos la Tierra. La atmósfera terrestre está formada todavía en su mayor parte por hidrógeno, el elemento más común del Cosmos. Más tarde, este hidrógeno escapará de la gravedad terrestre, y dominarán la atmósfera el nitrógeno y el oxígeno. Pero mientras todavía la atmósfera es de hidrógeno, se forma una vida sencilla, y en marzo encontramos los organismos unicelulares de Onverwacht. La vida sigue evolucionando, pero sólo las seis últimas semanas de nuestro año nos son bien conocidas gracias a los fósiles. Mientras tanto, la mayor parte del hidrógeno ha escapado y los seres vivos cambian al oxígeno. A fines de noviembre las plantas y más tarde los animales conquistan las masas terrestres; los saurios se extinguen entre Navidades y el día de San Esteban, después de haber dominado la Tierra durante una semana. El 31 de diciembre a las 23 horas aparece el hombre de Pekín, 10 minutos antes de año nuevo se presenta el de Neandertal a la fiesta de fin de año, y 5 minutos antes de dar las doce campanadas aparecen las razas humanas actuales; 30 segundos antes del cambio de año comienza nuestra historia universal. En estos últimos 30 segundos el hombre se multiplica por cien. Esta proliferación es especialmente rápida en los últimos segundos; sólo en el último segundo ya se triplica la población de la Tierra. Apenas cuatro décimas de segundo antes de disparar los cohetes de año nuevo, se emite el primer programa de radio.

La Tierra contiene vida en la mayor parte de su existencia, pero lo que llamamos civilización ocupa sólo una parte insignificante de su historia.

¿HAY EN NUESTRA GALAXIA UN MILLÓN DE PLANETAS CON VIDA?

La evolución de la vida es un proceso tan lento, que podemos compararlo perfectamente con la evolución temporal de las estrellas. Sabemos que en el cielo hay estrellas tan jóvenes que el pitecántropo de Java fue testigo de su nacimiento. En los planetas de tales estrellas no puede haber evolucionado hasta hoy ningún tipo de vida superior, y sabemos que algunas estrellas de gran masa sólo emiten luz y calor durante unos cuantos millones de años, un intervalo demasiado corto para la evolución de la vida. Por tanto, sólo resultan adecuadas para la vida estrellas con la masa del Sol o con una masa inferior. En la Vía Láctea hay unos 100.000 millones de estrellas. Casi todas ocupan el intervalo de masa "adecuado", pues el número de estrellas de gran masa es muy reducido.

Si exceptuamos un pequeño porcentaje de estrellas, todas las demás estrellas de la Vía Láctea proporcionan calor a sus posibles planetas durante el tiempo suficiente para que evolucione en ellos vida inteligente. Sin embargo, no es seguro que giren planetas alrededor de todas estas estrellas. Y sólo en un cuerpo en órbita alrededor de una estrella dominan temperaturas que dejan el agua en estado líquido. Por desgracia el astrónomo no conoce sistemas planetarios en otros soles. Incluso las estrellas más cercanas están demasiado lejos para poder captar directamente con el telescopio sus posibles pero diminutos acompañantes. Sin embargo, es muy probable que giren planetas alrededor de los demás soles; es importante que el hombre no se crea habitante de un sistema solar especial. La creencia de que ocupamos un lugar privilegiado en el Universo se ha demostrado siempre falsa en la historia de la ciencia.

Vimos ya que las estrellas solas tienen probablemente sistemas planetarios debido a la acción del momento cinético de la materia cósmica. Nuestro propio sistema planetario refuerza esta opinión. Incluso los grandes planetas Júpiter y Saturno tienen a su alrededor lunas que constituyen pequeños "sistemas planetarios", cuya existencia se debe también seguramente al momento cinético. Es razonable suponer, por tanto, que alrededor de todas las estrellas solitarias giran sistemas planetarios.

En cambio, cuando al nacer las estrellas el momento cinético crea un sistema estelar doble, los planetas, suponiendo que lleguen a formarse, al cabo de un intervalo de tiempo breve desde el punto de vista cósmico o bien acaban precipitándose en los astros principales o bien son proyectados al espacio. Un estudio detallado permite descubrir que más de la mitad de las estrellas forman parte de sistemas dobles, por tanto sólo nos quedan unos 40.000 millones de astros poseedores de planetas.

Se plantea ahora una pregunta: ¿Están situados los planetas a la distancia correcta de sus estrellas? Un planeta ha de orbitar a una distancia mínima para que la radiación sitúe la temperatura de su superficie a la del agua líquida. En nuestro sistema planetario, Mercurio está demasiado cerca del Sol y los planetas exteriores, es decir,

todos los que están más lejos que Marte, no reciben suficiente calor del Sol. No podemos siquiera ver los planetas de otras estrellas. ¿Cómo saber si están a la distancia correcta? Sólo podemos trazar analogías con nuestro sistema planetario. Es evidente que la Tierra está dentro de la zona de vida, y que Marte y Venus están en sus fronteras. Las fotografías de las sondas Mariner nos muestran una superficie marciana que nos recuerda, por su carácter inhóspito, la Luna. Marte posee una atmósfera que también contiene agua, pero las sondas de la serie Viking que aterrizaron suavemente en su superficie no pudieron descubrir ningún rastro de células vivas. Las sondas soviéticas han medido en la superficie de Venus temperaturas de más de 450 grados centígrados. También debemos pues eliminar a Venus como portadora de vida. Al parecer estamos solos en nuestro Sistema Solar.

Cuando pensamos en las condiciones que debe cumplir un planeta para que la vida sea posible, comprendemos lo afortunado y, a la vez, infrecuente que es un cuerpo celeste que tiene un clima soportable para la vida. Los científicos de la NASA creen que en nuestra galaxia hay como máximo un millón de planetas cuyas condiciones externas permiten la evolución de la vida hasta sus niveles superiores.

¿Si en un planeta domina durante un tiempo suficiente un clima adecuado, se forma en él realmente la vida? Ésta es una pregunta para biólogos, no para astrónomos. Pero el astrónomo puede ayudar; sabe que la distribución de los elementos químicos en todo el Universo, aparte de unas pocas excepciones, es más o menos la misma. Las estrellas más lejanas de nuestra galaxia, incluso las estrellas de otras galaxias, están formadas de la misma mezcla de elementos químicos que el Sol. No hay ninguna estrella de azufre ni ninguna nube de mercurio. Casi siempre el componente principal de la materia cósmica es el hidrógeno, luego viene el helio y después siguen los demás elementos químicos. Podemos garantizar a los biólogos que en un planeta lejano con clima favorable encontrarán también los materiales que necesita para construir todas sus moléculas orgánicas. Los radioastrónomos han encontrado en las nubes de gas una gran cantidad de química orgánica. Hay alcohol y ácido fórmico, ácido cianhídrico y éter dimetílico. Desde luego estos compuestos orgánicos sencillos quedan muy lejos de las complicadas moléculas que forman la base de lo que llamamos vida. Supongamos, sin embargo, que en todos los lugares donde puede formarse la vida nace la vida realmente; entonces habría en nuestra galaxia

un millón de planetas capaces de sostener la vida, una vida que dura desde hace cuatro mil millones de años. De todos modos, esta vida estaría situada en distintas fases de evolución.

¿CUÁNTO TIEMPO VIVE UNA CIVILIZACIÓN?

Como es natural, sólo nos interesan los planetas con los cuales podamos comunicarnos de algún modo, y la única posibilidad que parece ofrecerse son las señales de radio. Podemos preguntarnos: ¿Del millón de planetas que hay en nuestra galaxia, cuántos disponen de los medios técnicos necesarios para enviar señales de radio? Si los planetas enviaran señales ininterrumpidamente durante todo el tiempo en que existe en ellos la vida, tendríamos casi un millón de planetas emitiendo. Pero las algas azules no emiten, y también callan los organismos o seres que han destruido con bombas atómicas su técnica o que quizá se han destruido a sí mismos. Queda pues solamente una pequeña fracción. Nuestro millón de planetas se reduce a la fracción obtenida dividiendo el tiempo durante el cual una civilización puede emitir por el tiempo durante el cual hay vida en ellos.

¡Llegamos aquí a la gran incógnita! Sólo podemos recurrir a la experiencia de nuestra propia civilización. Hace sólo unos decenios que disponemos de los medios tecnológicos para emitir hacia el espacio. Pero casi al mismo tiempo desarrollamos por primera vez medios de destrucción masiva que pueden eliminar de golpe toda la vida de nuestro planeta. ¿Llegaremos a utilizarlos? ¿Dispone una civilización tecnológica como máximo de unos decenios para enviar señales al espacio antes de destruirse a sí misma?

Además, *nosotros* todavía no hemos empezado a emitir. No existe ningún programa científico para radiar señales al Universo de modo regular y dirigido. Pero seamos optimistas, supongamos que una civilización es capaz de resolver sus problemas. Supongamos que viva luego durante un millón de años en paz y bienestar para que pueda permitirse el lujo de emitir al espacio durante este intervalo de tiempo señales potentes de radio, y supongamos además que tenga interés en hacerlo. Esto significaría que del millón de estrellas con vida en sus planetas sólo emitiría la fracción:

$$\frac{\text{1 millón de años}}{\text{4.000 millones de años}}$$

En este caso estarían emitiendo en este momento 250 planetas de nuestra galaxia. Si suponemos que estos planetas están distribuidos uniformemente en nuestra galaxia, la distancia media entre dos civilizaciones emisoras es de 4.600 años luz. Nuestra señal viajará durante 4.600 años antes de llegar a la civilización emisora más cercana, y pasarán 9.200 años antes de recibir nosotros la respuesta. Vemos pues que carece de sentido estar a la escucha de estrellas cercanas como Tau Ceti y Épsilon Eridani. Es totalmente improbable que posean planetas emisores. Lo único lógico sería intentar captar las señales procedentes de *todas* las estrellas solas de tipo solar que estén a menos de 4.600 años luz de nosotros.

Desde la construcción de la torre de Babel no han pasado ni 4.000 años. Si una civilización vive y emite sólo durante este intervalo de tiempo, repitiendo el cálculo anterior vemos que en nuestra galaxia del millón de planetas con vida sólo emite actualmente la fracción:

$$\frac{4.000 \text{ años}}{4.000 \text{ millones de años}}$$

es decir, *un* solo planeta. Esto significa que en este instante, aparte de nosotros, en toda la galaxia como máximo hay otra civilización capaz de emitir. Si una civilización emite sólo durante 1.000 años o menos, en vano intentaríamos captar con nuestros radiotelescopios emisiones procedentes de nuestra galaxia.

El cálculo del número de planetas que emiten señales de radio en nuestra galaxia se basa en muchas incertezas. Más que determinar este número del modo más preciso posible me ha interesado mostrar los factores que juegan un papel en su determinación. En este juego mental hemos visto que la mayor incertidumbre se debe a nuestra ignorancia del tiempo que puede durar una civilización técnica. ¿Cuánto tiempo dura una civilización después de que ha logrado crear las primeras ondas de radio? ¿Le queda todavía un siglo de vida? ¿Puede subsistir a pesar de sus capacidades técnicas, o puede precisamente gracias a su técnica conservar la vida?

Nos habíamos planteado la posible existencia de vida extraterrestre en la Vía Láctea y hemos desembocado en el problema de nuestra posible supervivencia en la Tierra.

APÉNDICE A

LA VELOCIDAD DE LAS ESTRELLAS

Nuestros conocimientos sobre el Universo serían muy escasos si no dispusiéramos del análisis espectral. Sin él no sabríamos nada de la composición química de las estrellas y sabríamos pocas cosas sobre su movimiento. Yo quiero explicar aquí principalmente cómo los espectros estelares permiten deducir la velocidad con que una estrella se mueve en la dirección de la luz que nos envía, es decir, la velocidad con que se acerca o se aleja de nosotros. La componente de la velocidad en la dirección de su visual se llama *velocidad radial*, y el efecto que nos permite determinarla es el *efecto Doppler*, llamado así por el físico austríaco Christian Doppler (1803-1853).

Cuando se hace pasar la luz de una estrella por un prisma de cristal, se refracta. Esta refracción es más o menos intensa según las distintas frecuencias de la luz: la luz azul, que tiene frecuencia más alta, se refracta más que la roja, cuya frecuencia es menor. Si se sitúa el prisma ante un aparato fotográfico, la fotografía en lugar de un punto de luz muestra un rastro alargado: el *espectro* de la estrella. El ennegrecimiento del film está provocado en los distintos puntos de este rastro por luz de frecuencia distinta. Los espectrógrafos modernos que utiliza actualmente el astrónomo trabajan con el mismo principio. Para poder estudiar la luz de estrellas débiles se recoge la luz estelar con un gran telescopio antes de pasarla al prisma. En lugar de prismas se utilizan a menudo otros dispositivos que desvían de modo distinto la luz de distinta frecuencia, es decir, de color diferente. En nuestro aparato fotográfico el espectro era un rastro delgado, pero el espectrógrafo ensancha este rastro y forma una

banda donde pueden reconocerse mejor los detalles (véase figura A-1). La importancia de los espectros estelares reside en que los átomos de la atmósfera de una estrella absorben luz de determinadas frecuencias. Esta luz falta luego en el espectro: la banda fotografiada por el espectrógrafo contiene "líneas" es decir, puntos pertenecientes a frecuencias determinadas en las que la placa fotográfica no capta luz. La luz que falta en estos puntos fue absorbida por los átomos de la atmósfera de la estrella: las líneas oscuras se llaman *líneas de absorción*. Cada tipo de átomo crea un conjunto característico de líneas de absorción; por tanto, el espectro de una estrella permite determinar la composición química de su atmósfera. En esto se basa el análisis químico de las estrellas, análisis que la escuela de Kiel, dirigida por Albrecht Unsöld, llevó a una auténtica maestría. Todo lo que se ha dicho en este libro sobre la composición química de las atmósferas estelares y del gas interestelar se basa en las mediciones de líneas espectrales. También se descubrió de este modo la falta de deuterio en el Sol y la escasa abundancia del litio. No voy a entrar más en este tema, pues ahora sólo nos interesa el efecto Doppler.

La luz es una onda electromagnética. La intensidad del campo eléctrico en un punto del espacio fluctúa periódicamente cuando pasa por él un rayo de luz y los máximos y mínimos del campo se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz. Cuando una fuente emite luz de una frecuencia determinada, la captamos con esta misma frecuencia exacta, únicamente si la distancia entre la fuente y el receptor permanece constante. Pero si la fuente se mueve en dirección nuestra, cada máximo de la onda ha de recorrer un camino algo menor que la anterior. Los máximos nos llegan con una rapidez superior a la que fueron emitidos. La luz de la fuente que se acerca a nosotros parece de frecuencia superior, es decir, más azul, que la luz de una fuente igual del laboratorio. E inversamente, la luz de una fuente que se aleja de nosotros parece de menor frecuencia, es decir, más roja, que la luz de una fuente del mismo tipo del laboratorio. Este cambio, en realidad no es más que el efecto discutido en la figura 10-5, porque también los intervalos temporales de los destellos de rayos X cambian según que la fuente, siguiendo su movimiento orbital, se acerque hacia nosotros o se aleje de nosotros.

Las líneas de absorción de los espectros estelares permiten medir muy bien el efecto Doppler (véase fig. A-2). El mejor sistema para ello es comparar el espectro estelar con el espectro de un material llevado a incandescencia en el laboratorio cuya luz se hace pasar por *el mismo* espectrógrafo, y comprobar si las líneas de absorción de cada tipo de átomo del espectro estelar están situadas donde les corresponde o están desplazadas. Luego puede calcularse fácilmente la velocidad radial de la estrella.

Tiene una importancia especial medir la velocidad radial de estrellas dobles próximas. Cuando una estrella gira alrededor de otra, se mueve hacia nosotros en una parte de su órbita y se aleja de nosotros en otra parte de ella, suponiendo que no observemos la



Fig. A-1. Espectro de la estrella 41 Cygni, registrado por Waltraut Seitter de la Universidad de Münster. A la izquierda está el extremo violeta del espectro. Las ondas desviadas hacia aquel extremo tiene una frecuencia superior a las ondas desviadas hacia el extremo derecho, que pertenecen a la luz roja. Las líneas oscuras son líneas de absorción de los distintos átomos. Por ejemplo, las dos líneas vecinas de parecida intensidad situadas en el centro (designadas H y K) pertenecen al átomo de calcio. También pueden observarse en el espectro de la figura A-2.



Fig. A-2. El efecto Doppler en el espectro. (a) Espectro original de una estrella. (b) Representación esquemática del desplazamiento de las líneas cuando la estrella se mueve hacia nosotros. Todas las líneas se han desplazado ahora hacia la izquierda, hacia el violeta o las frecuencias altas, como puede comprobarse por la línea vertical de trazos dibujada sobre el fondo negro y por las flechas de desplazamiento. (c) Desplazamiento correspondiente a una estrella que se aleja de nosotros. Las líneas se han desplazado ahora hacia el rojo.

órbita perpendicularmente. Esta variación periódica de la velocidad radial puede medirse en el espectro y, como explicamos en el Apéndice C, puede utilizarse para medir la masa de las estrellas. En muchos sistemas estelares dobles hemos sabido que la estrella no está sola gracias únicamente al desplazamiento de las líneas espectrales provocado por el efecto Doppler. Estas estrellas están demasiado lejos de nosotros y demasiado juntas unas a otras para que puedan observarse separadas en el telescopio. Aunque no se oculten mutuamente, el desplazamiento periódico de sus líneas de absorción nos revela que hay dos estrellas que orbitan una alrededor de la otra.

APÉNDICE B

CÓMO MEDIR EL UNIVERSO

No podríamos decir casi nada sobre las estrellas si no supiéramos la distancia que nos separa de ellas. Un diminuto punto de luz en el cielo puede ser una estrella de menos de un metro de diámetro situada cerca de la Tierra, que carece de luz propia y sólo refleja la luz del Sol, o puede ser un astro que emite tanta luz como la entera galaxia, pero que está situado a gran profundidad en el Universo, de modo que la distancia nos oculta la magnificencia de su esplendor. Es difícil deducir las distancias en el Universo a partir de las distancias directamente medibles en la Tierra.

La medición de nuestro Sistema Solar no tiene problemas hoy en día, en la era de la electrónica. Se distingue un haz de radar a Venus y se utiliza la ley que descubrió Johannes Kepler al empezar la guerra de los Treinta Años, la llamada *tercera ley de Kepler*. Hay una relación entre el período orbital de los planetas que giran alrededor del Sol y los radios de sus órbitas. Supongamos dos planetas A y B, por ejemplo Venus y la Tierra. La ley de Kepler afirma:

$$(\text{período orbital de A})^2 \times (\text{radio orbital de B})^3 = $$
$$= (\text{período orbital de B})^2 \times (\text{radio orbital de A})^3$$

Los períodos orbitales de los planetas pueden observarse directamente (Tierra: 365,26 días; Venus: 224,70 días); por tanto, la ley anterior nos proporciona una ecuación para ambos radios.

Podemos enviar señales de radar de la Tierra a Venus, y una vez reflejadas en aquel planeta recibirlas de nuevo. El tiempo que

tardan las señales de radar propagándose a la velocidad de la luz nos da la distancia entre la Tierra y Venus, es decir, la diferencia de los radios de las órbitas de ambos planetas. Tenemos pues dos ecuaciones con dos incógnitas, a saber: los radios orbitales de la Tierra y de Venus, que podemos resolver.

El siguiente paso nos lleva de nuestro Sistema Solar a las estrellas. El astrónomo utiliza el *método de los paralajes*, propuesto ya por Galileo Galilei, como vimos en el capítulo 4, pero utilizado por primera vez (con éxito) por Friedrich Wilhelm Bessel con la estrella 61 Cygni. La Tierra gira a lo largo del año alrededor del Sol, por tanto las estrellas cercanas en el transcurso del año aparecen en direcciones cambiantes del cielo. La figura B-1 representa el fenómeno esquemáticamente. Conocemos la línea que une la posición de la Tierra el 1 de enero con su posición el 1 de julio: es el doble del radio orbital de la Tierra. El astrónomo puede medir los dos ángulos que forma esta línea con la estrella observando la estrella en los días citados. Conoce así dos ángulos y un lado del triángulo marcado en la figura. Si se conocen tres elementos de un triángulo pueden determinarse todos los demás. Así nos lo enseñaron en la escuela. También pueden calcularse las distancias estrella-Tierra el 1 de enero y el 1 de julio. En todos los casos prácticos la estrella está tan lejos que no tienen importancia las distinciones finas entre estas dos distancias.

Hemos obtenido la distancia entre la estrella y nuestro Sistema Solar. Con este método la triangulación cósmica puede extenderse hasta una distancia de unos 300 años luz. Concretamente las distancias de todas las estrellas representadas en el diagrama HR de la figura 2-2 situadas en las proximidades del Sol se determinaron con el método de los paralajes. Si las estrellas están situadas a mayor distancia en el espacio, las diferencias entre las distancias observadas a intervalos de medio año son tan pequeñas que ya no pueden medirse. El método acaba fallando.

Quisiera describir ahora muy por encima otro método importante para determinar distancias. Se basa en que las estrellas de un cúmulo estelar se mueven todas en la misma dirección con idéntica velocidad y siguiendo trayectorias paralelas. El movimiento observable en el cielo es muy pequeño y produce desplazamientos apenas medibles, pero puede descubrirse que las trayectorias paralelas de muchos cúmulos estelares se dirigen hacia un punto del cielo, como los raíles paralelos de una vía de tren que se juntan en un punto del horizonte. Este punto final nos indica hacia dónde se desplaza el grupo de estrellas. Si este conocimiento se completa con la velocidad radial de las estrellas, medida con el efecto Doppler, y con la velocidad con que se desplaza de año en año en relación a estrellas más lejanas, puede determinarse perfectamente su distancia. También en este caso se llevan a cabo cálculos sencillos de triangulación, en los que no voy a entrar ahora. Se han determinado así las distancias a muchos cúmulos estelares, lo que ha permitido luego determinar la luminosidad de sus estrellas y sus regularidades en el diagrama HR, como explica el capítulo 2.

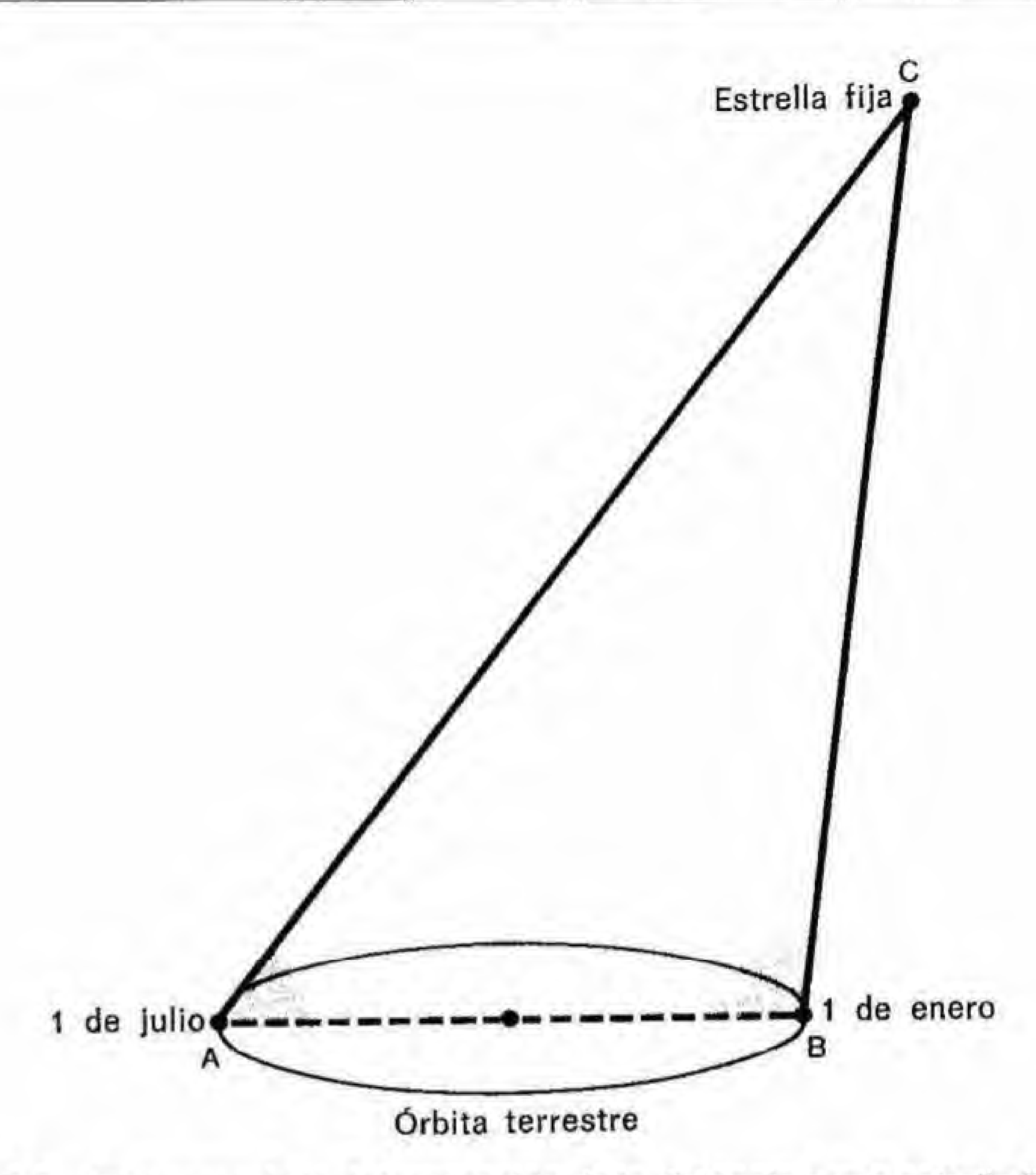


Fig. B-1. Esquema de la determinación de la distancia a una estrella fija mediante el método de los paralajes. La distancia de A a B es el doble de la distancia Sol-Tierra, que se ha determinado mediante ecos de radar de Venus. Pueden medirse, además, los dos ángulos A y B correspondientes al 1 de enero y al 1 de julio; por tanto, conocemos tres elementos del triángulo ABC. Calcular los lados que faltan constituye un sencillo ejercicio escolar.

El proceso puede continuar. Si un cúmulo estelar está tan alejado que fallan los métodos para determinar su distancia descritos hasta ahora, puede aprovecharse el hecho de que sus estrellas de poca masa están situadas en la secuencia principal y de que cada una de ellas tiene la luminosidad correspondiente a su color, según corresponde a una estrella de la secuencia principal. Por tanto, si puedo medir el color de una estrella del cúmulo situada en la secuencia principal sé inmediatamente su luminosidad. Si la comparo con el brillo aparente de la estrella en el cielo, un breve cálculo me permite determinar su distancia y con ella la del cúmulo.

Es casi un milagro que pueda penetrarse todavía a mayor distancia en el espacio. Como hemos visto en el capítulo 6, las estrellas pulsantes del tipo cefeido presentan una notable propiedad, por motivos que fueron incomprensibles durante mucho tiempo. Existe una relación unívoca entre su período de oscilación y la luminosidad (véase fig. B-2). La paciente observación de una estrella cefeida permite determinar fácilmente su período de pulsación, y la relación representada en la figura B-2 permite deducir directamente la luminosidad media de una oscilación. Si la comparamos con el brillo medio de la estrella en el cielo, obtenemos de nuevo rápidamente la distancia. Las estrellas cefeidas son muy brillantes y pueden observarse más allá de los rincones más lejanos de la Vía Láctea: sus subidas y bajadas de brillo pueden descubrirse incluso entre las estrellas de otras galaxias, y nos permiten extender la determinación de distancias desde nuestra galaxia hasta bastante más allá de la galaxia de Andrómeda.

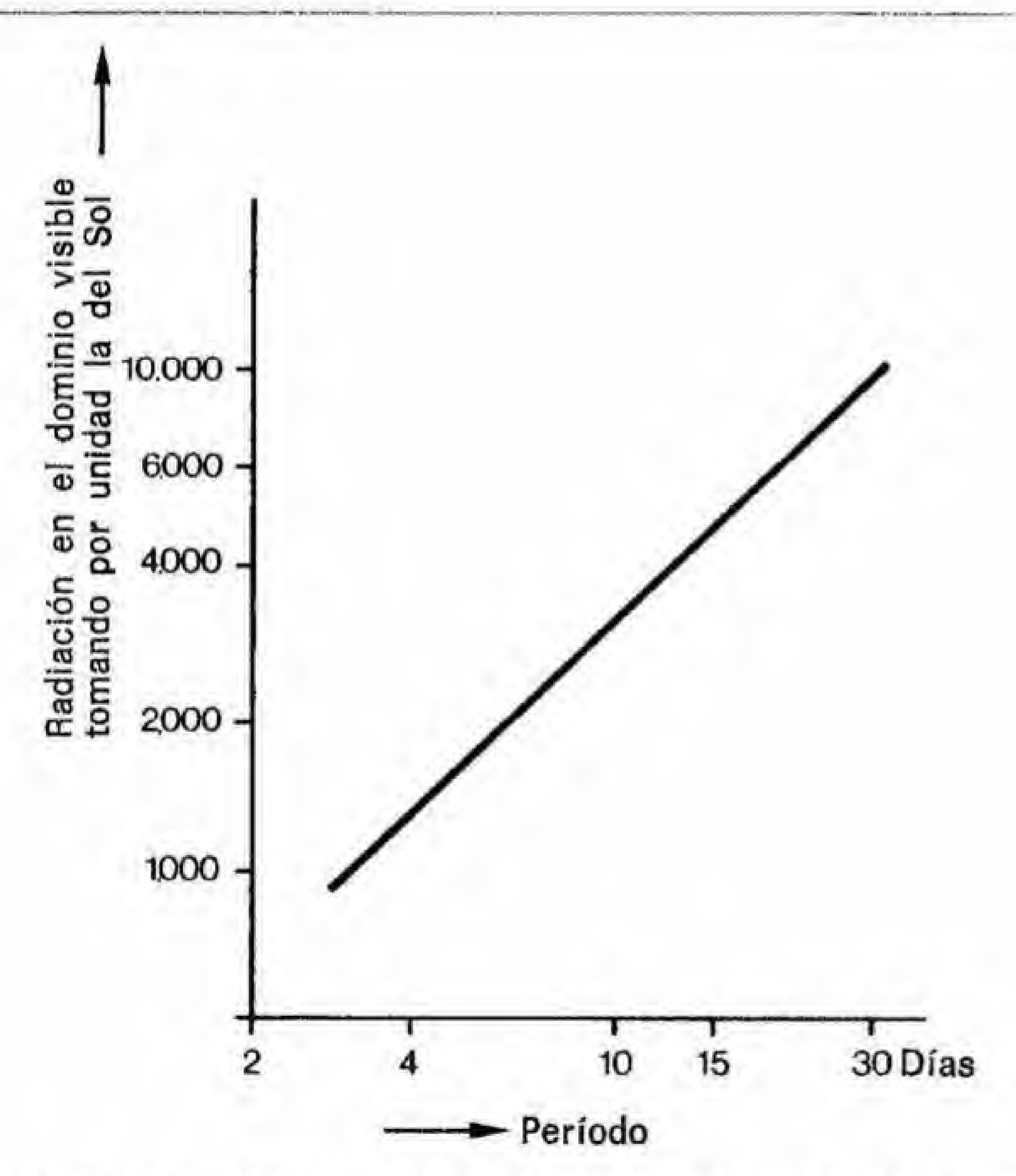


Fig. B-2. Relación período-luminosidad de las estrellas cefeidas. A cada período de estas estrellas corresponde una luminosidad concreta. Los períodos pueden determinarse fácilmente; por tanto, puede deducirse inmediatamente la luminosidad media correspondiente a este período. Esta luminosidad, comparada con el brillo aparente de la estrella en el cielo, nos da su distancia.

APÉNDICE C

CÓMO PESAR ESTRELLAS

La técnica moderna ha proporcionado a los astrónomos refinados instrumentos de precisión y acceso a los modernos computadores; sin embargo, la determinación de las masas estelares no ha superado mucho los métodos descubiertos por Johannes Kepler e Isaac Newton, es decir, unas concepciones que tienen ya trescientos años. Empecemos con la masa del Sol. La Tierra se mueve en su campo gravitatorio describiendo casi un círculo. Mientras recorre esta órbita, la Tierra capta la fuerza centrífuga que intenta proyectarla al espacio. A ella se opone la fuerza de atracción solar, que intenta estirar nuestros planetas hacia el interior del globo solar. La Tierra recorre su órbita de modo que estas dos fuerzas contrapuestas estén en equilibrio. Este equilibrio de las dos fuerzas permite determinar la fuerza atractiva que ejerce el Sol y, con ello, su masa. La fórmula correspondiente es:

$$(\text{radio orbital del planeta})^3 = \text{constante de la gravitación} \times \\ \times (\text{masa del planeta} + \text{masa solar}) \times (\text{período orbital del planeta})^2$$

La constante gravitatoria es un número conocido por la física. El radio orbital del planeta Tierra puede calcularse con el método descrito en el Apéndice B para determinar distancias. El período orbital de la Tierra es un año. Nuestra ecuación contiene pues sólo una incógnita: la suma de las masas de la Tierra y del Sol, y la incógnita puede despejarse fácilmente. La masa de la Tierra no es nada en

comparación de la masa del Sol; por tanto, la suma anterior es prácticamente igual a la masa solar.

¿Cómo determinaremos ahora la masa de las estrellas? El procedimiento es casi el mismo en el caso de las estrellas dobles que pueden separarse con el telescopio, es decir, que pueden observarse como dos estrellas solas moviéndose una alrededor de la otra. La diferencia consiste únicamente en que allí los astros que giran uno alrededor de otro no suelen tener masas tan diferentes como el Sol y la Tierra. En su caso es mucho más evidente un hecho que antes habíamos ignorado: en vez de girar un astro alrededor del otro, cada uno se mueve alrededor del centro de gravedad común. Por tanto, en un sistema doble de dos estrellas a las que llamaremos A y B, es válida la siguiente relación:

(Distancia de ambas estrellas)^3 = constante gravitatoria ×
× (masa de A + masa de B) × (período de rotación)^2

Y para la distancia al centro de gravedad de ambas estrellas podemos escribir:

(distancia de A al centro de gravedad) × (masa de A) =
= (distancia de B al centro de gravedad) × (masa de B)

La distancia de A a B es evidentemente la suma de las distancias de cada estrella al centro de gravedad (véase fig. C-1). Supongamos ahora que podemos ver por separado ambas estrellas con el telescopio y medir sus órbitas en relación al centro de gravedad común. Conoceremos entonces sus distancias y sus períodos orbitales y obtendremos inmediatamente la suma de las dos masas. Observaremos también cómo giran ambas estrellas una alrededor de la otra y obtendremos las distancias respectivas al centro de gravedad. La segunda ecuación nos proporciona entonces la razón de las dos masas. Con la suma y el cociente podemos calcular cada una de las masas. Por simple que parezca el método, presupone el conocimiento de la distancia de las estrellas y un conocimiento más preciso todavía de los radios de las órbitas recorridas por cada estrella alrededor del centro de gravedad. El astrónomo ve las órbitas de las estrellas, pero sólo puede determinar su movimiento angular en el cielo. Para poder obtener distancias reales entre las estrellas necesita saber su distancia a nosotros.

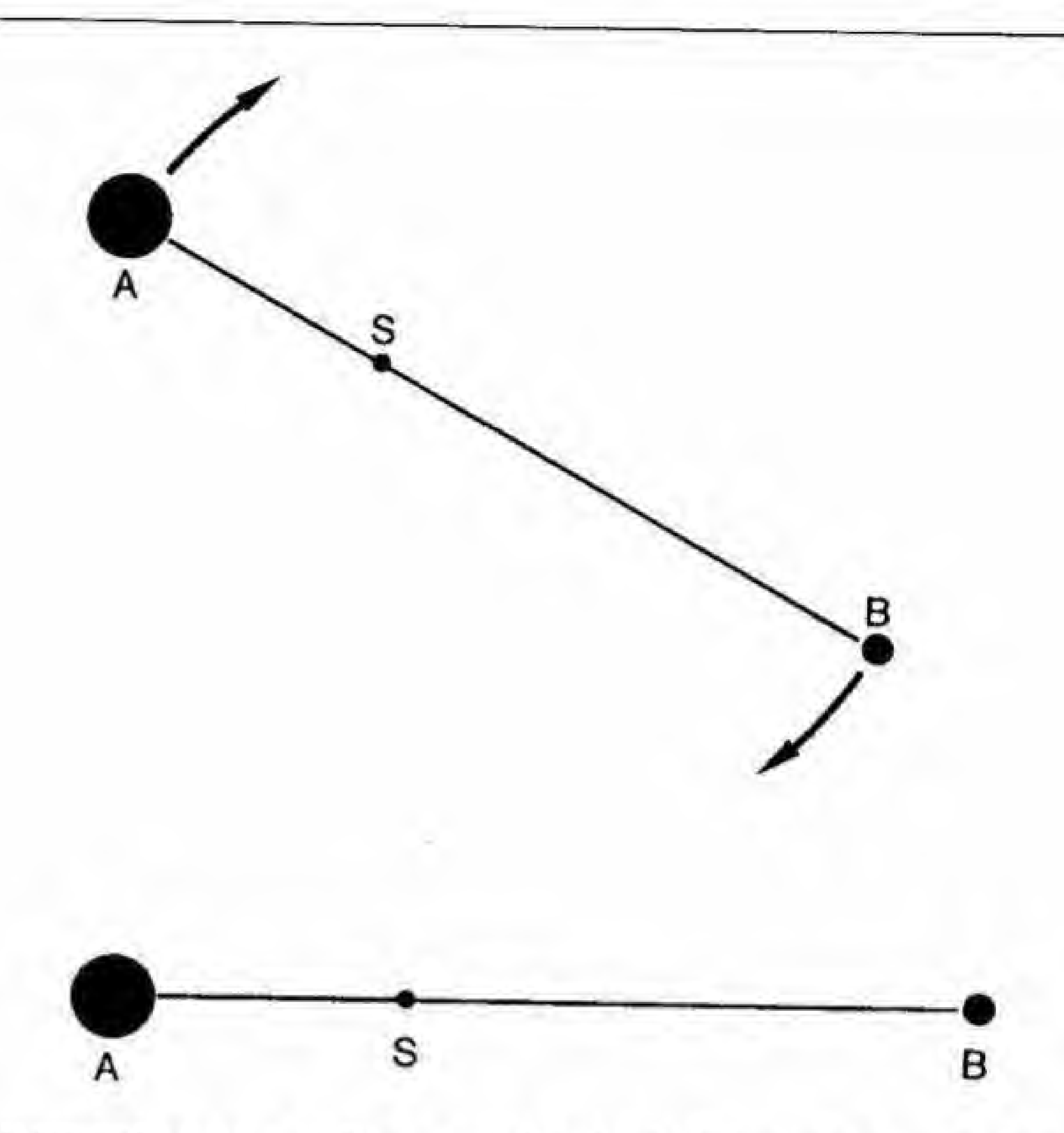


Fig. C-1. Movimiento en un sistema estelar doble (simple). *Arriba:* Punto de mira perpendicular al plano orbital. Las dos estrellas A y B se mueven en órbitas circulares de radios distintos alrededor del centro de gravedad común S. *Debajo:* El mismo movimiento observado de lado. Cuando la línea que une ambas estrellas es exactamente perpendicular a la dirección del observador —como ahora en el dibujo—, una de las estrellas al moverse se acercará a nosotros, mientras la otra se alejará. Las correspondientes velocidades pueden calcularse luego mediante el efecto Doppler descrito en el Apéndice A.

La determinación de las masas por el método que acabo de describir exige saber la distancia que nos separa del sistema estelar doble; por tanto, el método sólo sirve para objetos relativamente cercanos. Sin embargo, este método ayudó precisamente a descubrir la relación masa-luminosidad de las estrellas de la secuencia principal (véase fig. 2-4).

Afortunadamente existe otro método que permite evitar la laboriosa determinación de la distancia. Gracias al efecto Doppler (véase Apéndice A) podemos deducir del espectro la velocidad con que la estrella se acerca o se aleja de nosotros. Si vemos de lado el sistema doble como el representado en la parte inferior de la figura C-1 y si en un momento determinado la línea que une A con B es

perpendicular a nuestro punto de mira, una de las estrellas se moverá hacia nosotros y la otra se alejará de nosotros. Las velocidades se obtienen dividiendo la longitud de las órbitas por la duración del movimiento orbital, es decir:

$$\text{Velocidad de A} = \frac{2\,\pi \times (\text{distancia de A al centro de gravedad})}{\text{período orbital}}$$

$$\text{Velocidad de B} = \frac{2\,\pi \times (\text{distancia de B al centro de gravedad})}{\text{período orbital}}$$

Ambas velocidades pueden medirse con ayuda del efecto Doppler, y el período orbital se determina observando el movimiento de las estrellas. Se obtienen así las dos distancias al centro de gravedad y las dos fórmulas vistas más arriba proporcionan dos ecuaciones para las dos masas estelares.

Lo maravilloso de este método es que no es preciso observar por separado ambas estrellas con el telescopio. Aunque la luz de ambas estrellas se funda en un único puntito luminoso, el espectro permite reconocer que la radiación que nos llega está formada por dos fuentes luminosas y las velocidades de ambas fuentes pueden determinarse por separado.

En realidad la cosa en más complicada. A menudo las órbitas no son círculos sino elipses y no las observamos perpendicularmente como en la figura C-1, ni exactamente de lado, sino con una cierta inclinación. Pero esto no cambia el principio en que se basan los métodos descritos.

Desde que se descubrió la relación masa-luminosidad de las estrellas de la secuencia principal se ha podido determinar también de otra manera la masa de muchas estrellas. Si se conoce la luminosidad de una estrella y se sabe que pertenece a la secuencia principal, su masa puede deducirse directamente de la relación luminosidad-masa. Si es una estrella de la secuencia principal de la cual sólo puede medirse la temperatura superficial, la luminosidad se deduce del diagrama HR y luego la masa se obtiene nuevamente de la relación masa-luminosidad. Esto nos sirve cuando la estrella no cuenta con ninguna acompañante que ayude a deducir su masa.

EPÍLOGO A LA EDICIÓN DE 1993

Desde la primera edición de este libro han transcurrido más de trece años. La astronomía se encuentra ahora en un estadio mucho más avanzado que entonces. Los nuevos instrumentos nos permiten observar fenómenos acerca de los cuales no sabíamos nada o muy poco en 1980. Todavía no existían sondas interplanetarias que se hubiesen acercado hasta los planetas exteriores, Urano y Neptuno. En el polo sur terrestre apenas se habían empezado a observar de manera ininterrumpida las oscilaciones solares con la intención de conocer algo más acerca de la estructura interna del Sol. No sólo se simulaban en los ordenadores los procesos de evolución relativamente lentos de las estrellas sino que se intentaba también calcular, con la ayuda de superordenadores, las rápidas transformaciones que tienen lugar durante la explosión de una supernova. En aquel momento no se sospechaba todavía que el fogonazo de una explosión estelar relativamente cercana, que viajaba por el espacio desde hacía 170.000 años, estaba a punto de alcanzarnos, que se encontraba a unos pocos años de la Tierra.

Hemos aprendido muchas cosas nuevas en los trece años transcurridos, si bien la imagen de la evolución de las estrellas, desde su nacimiento a partir del polvo y el gas interestelares hasta su muerte como enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros, tal como los describí entonces, sigue siendo válida a grandes rasgos. Los misterios que nos intrigaban continúan sin resolverse en la actualidad, a pesar de que en uno u otro caso hayamos aprendido cosas nuevas.

Si bien hoy sabemos más acerca de la eficacia de las reacciones

nucleares, sigue siendo cierto que el Sol se convertirá algún día en una gigante roja, engullendo en su interior a los planetas interiores Mercurio y Venus, y aproximándose peligrosamente a la superficie del planeta Tierra.

Sin embargo, el problema de los neutrinos solares presenta una solución incompleta. En el depósito de cloroetileno situado en una mina de Dakota se siguen contando los átomos de cloro, y el resultado no ha variado: procedentes del Sol nos llegan muchos menos neutrinos, capaces de interactuar con el cloro, de los que predicen los modelos estelares propuestos por los teóricos. Esto se ve confirmado también por las mediciones que se han realizado al oeste de Tokio, en Kamioka, en el interior de la mina de cinc. Allí se controlan más de 2.000 toneladas de agua dotadas de la ayuda de células fotoeléctricas, con el fin de capturar protones cuando se desintegran, tal como predicen las modernas teorías acerca de las partículas elementales. Sin embargo, no sólo los protones desintegrados deberían producir destellos luminosos débiles en el depósito de agua; también los neutrinos solares, procedentes de la reacción secundaria del boro en el Sol, deberían producir estos destellos. Entre enero de 1987 y mayo de 1988 se controló el agua a la búsqueda de las luces generadas por los neutrinos solares. El resultado confirmaba las mediciones de Raymond Davis. El número de neutrinos solares que impactaron sobre el agua del depósito fue a lo sumo la mitad del esperado. Dado que este dispositivo es además sensible únicamente a los neutrinos muy energéticos de la reacción secundaria del boro, los astrofísicos se pudieron consolar aún con el hecho de que esta reacción apenas aporta nada a la generación de energía en el Sol. Sin embargo, entre tanto, ha llegado la hora de la verdad.

El experimento del galio, de cuya planificación he hablado en el capítulo V, está ya en marcha y ha suministrado los primeros resultados. Se emplean 30 toneladas de galio para detectar los neutrinos solares en el experimento GALLEX, instalado en los Abruzos (Italia), a 1.200 metros bajo tierra en una caverna excavada desde el túnel de una autopista. Paralelamente funciona un segundo experimento en el Cáucaso, bautizado con el nombre de SAGE, acrónimo de «Soviet-American Gallium Experiment». Inicialmente los astrofísicos pudieron respirar tranquilos. GALLEX ha registrado los neutrinos de baja energía, procedentes de las reacciones principales de la cadena protón-protón, con aproximadamente la misma frecuencia predicha por los modelos de ordenador. Sin embargo, al igual que antes, queda abierta la cuestión de por qué son tan pocos los neutrinos de boro de alta energía, a los que el experimento GALLEX es insensible. Los neutrinos de boro son indicadores sensibles de temperatura, mientras que los neutrinos de baja energía sólo permiten formular unas pocas afirmaciones acerca de la temperatura del interior del Sol. ¿Dónde está el error?

Si los neutrinos, procedentes directamente de la zona central del Sol, nos ofrecen indicios acerca de la estrella más próxima a nosotros, en cuyo interior no puede penetrar nuestra mirada, entonces nos encontramos en el buen camino para interpretar las informaciones que el Sol emite hacia el exterior desde sus profundidades. A la aparición y desaparición constante de la granulación de la superficie del Sol se superponen oscilaciones con millones de formas, oscilaciones que el Sol lleva a cabo en períodos de varios minutos. Las innumerables formas de oscilación se superponen a un patrón complejo, que se puede resolver en oscilaciones individuales, cuando se observa de manera continuada el movimiento de la superficie solar en series de observación prolongadas. Dichas oscilaciones pueden desentrañarse gracias a los resultados obtenidos mediante el empleo de ordenadores. Ondas de diferentes formas y duraciones penetran a distintas profundidades en el Sol. El geólogo obtiene algunos datos acerca de la estructura del interior de la Tierra a partir de las ondas sísmicas que, partiendo de un epicentro, llegan hasta nosotros, en parte, a lo largo de la superficie y, en parte, a través del interior de la Tierra. Del mismo modo, el físico solar obtiene algunas informaciones acerca de la estructura interna del Sol a partir de las formas de oscilación, que si bien se observan en la superficie solar afectan a la *totalidad* del Sol. Dado que las oscilaciones se diferencian en cuanto a sus frecuencias únicamente por milésimas de segundos entre sí, hay que llevar a cabo observaciones a lo largo de períodos prolongados hasta que las oscilaciones con períodos muy parecidos se desacoplan mínimamente del ritmo general, pudiendo diferenciarse unas de otras. El tiempo que transcurre entre el orto y el ocaso del Sol en nuestras latitudes es insuficiente, mientras que en los polos el Sol no se pone durante períodos de seis meses y la serie de observaciones no se ve interrumpida por la temprana caída de la noche. Por este motivo el patrón de las oscilaciones solares se observa desde el polo Sur.

Las investigaciones llevadas a cabo hasta ahora acerca de las oscilaciones solares nos han permitido determinar con mayor precisión la profundidad de la zona de convección exterior del Sol, a la que nos hemos referido ya en el capítulo IV. De acuerdo con estos descubrimientos, en el 30% exterior del radio solar la energía generada en el interior es transportada hacia el exterior mediante burbujas de gas que ascienden y descienden, es decir, gracias a un proceso de convección. También se conoce ahora con mayor detalle la proporción entre los elementos helio e hidrógeno. Las oscilaciones del Sol se ajustan mucho mejor a aquellos modelos en los cuales la cantidad en peso de hidrógeno es tres veces mayor que la de helio. En breve conoceremos más detalles acerca de la rotación que tiene lugar en el interior del Sol.

Una red de estaciones de observación que abarca toda la Tierra y que se conoce con el nombre de GONG (Global Oscilation Network) es la encargada de observar el Sol de manera ininterrumpida. Así, en el imperio de GONG nunca se pondrá el Sol. Además la sonda SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), que, como muy pronto se lanzará al espacio, en marzo de 1995, observará las oscilaciones del Sol de manera continua y a lo largo de un período prolongado.

Los astrónomos de todo el mundo se sobresaltaron al enterarse de que el 23 de febrero de 1987 había explotado una supernova en la Gran Nube de Magallanes. A pesar de que este hecho no había tenido lugar en el disco del sistema de nuestra Vía Láctea, se encontraba, sin embargo, relativamente cerca de nosotros, a tan sólo 170.000 años luz. Se trataba de la supernova más cercana a nuestro planeta desde la invención del telescopio. Esta vez no sólo era posible observar el fenómeno en el rango del visible con la ayuda de los telescopios y los espectrógrafos, sino también estudiarlo para los rangos de la luz ultravioleta y los rayos X, desde sus órbitas cercanas a la Tierra, con la ayuda de instrumentos situados fuera de la atmósfera terrestre. Incluso fue posible registrar los neutrinos, emitidos durante las reacciones nucleares que se verifican en el transcurso de la explosión. Tanto el experimento situado en la Mina de Kamioka como uno instalado en una mina de sal del Estado de Ohio (EE.UU.) registraron neutrinos que habían viajado durante 170.000 años antes de alcanzar la Tierra. Por lo demás, la Nube de Magallanes está situada en el hemisferio sur celeste, mientras que los receptores de Japón y Ohio se encuentran en latitudes del norte. Por lo tanto, los neutrinos procedentes de la supernova habían pasado a través del interior de la Tierra alcanzando los instrumentos por su parte inferior.

Dado que la Gran Nube de Magallanes es un objeto muy fotogénico, siempre se ha explorado con gran detalle. Por este motivo disponemos ahora por primera vez de imágenes de la estrella que explotó más tarde. ¿Qué aspecto tenía? Durante la noche del 23 de febrero de 1987 –la noticia del descubrimiento de la supernova se comunicó al mundo el 24 de febrero por la mañana– casi todos los astrónomos hubiesen estado dispuestos a apostar que todas las estrellas que acaban explotando como supernovas pasan con anterioridad por una fase de gigante roja. Sin embargo, la estrella que apareció en la Gran Nube de Magallanes como la supernova 1987 A –así es como se llama de acuerdo con la nomenclatura empleada por los astrónomos– era azul. Esto contradecía los principios fundamentales de la teoría de la evolución estelar, según los cuales las estrellas que han consumido el hidrógeno de su núcleo se transforman en gigantes rojas. No es tampoco así, pues hemos visto que entonces, si bien en un principio se mueven de izquierda a derecha (del azul al rojo) en el diagrama Hertzsprung-Russell, pueden volver de nuevo a la zona azul. Pueden pasar varias veces de una zona a la otra (véase por ejemplo la estrella de 9 masas solares de la figura 6-2). Por lo tanto, una presupernova azul no es nada completamente imposible.

La supernova 1993 J sirvió en cierto modo de consuelo a los astrofísicos. El 28 de marzo de 1993, el astrónomo aficionado español Francisco García Diez descubrió una supernova en la Galaxia registrada durante más de 200 años en los catálogos con el nombre de M 81. Este sistema estelar está situado a una distancia seis veces superior a la de la Gran Nube de Magallanes, si bien, en comparación con otras galaxias, está muy próxima a nosotros. En este caso también se logró localizar en imágenes anteriores la estrella que había explotado. De hecho, se trataba de una supergigante. Las espectaculares apariciones de supernovas de los años 1987 y 1993 se debieron ambas a la implosión de sus núcleos de hierro en su región central, tal como se muestra esquemáticamente a la izquierda en la figura 11-1.

La supernova 1987 A se ha observado cuidadosamente desde su descubrimiento. Se han detectado anillos, que provienen evidente-

mente de las masas de gas que la estrella había eyectado durante su fase tranquila, y que son atravesadas e iluminadas por los rayos de los destellos. Se ha detectado radiación gamma, que procede del elemento radioactivo cobalto, en realidad del Co^{56}. Este isótopo del cobalto se genera en el material en explosión y se desintegra en el plazo de 14 días, proceso durante el cual emite la radiación gamma muy energética observada.

Nos gustaría saber si después de la explosión ha quedado como resto una estrella de neutrones. Hasta hoy no se han podido recibir señales de ningún pulsar situado en esta región. Sin embargo, esto no nos dice mucho, dado que la orientación del eje de rotación y del eje magnético debería ser precisamente tal, que el cono de radiación pasase justamente por nuestro planeta. Incluso aunque la fuente luminosa no envíe impulsos radio desde allí hacia la Tierra, la zona que rodea el pulsar debería emitir rayos X en todas direcciones. Provisionalmente no existe todavía ningún indicio acerca de una estrella de neutrones en rápido cambio situada en el centro de la nube generada por la explosión, que ahora brilla con un ritmo lento.

Durante los últimos años el número de pulsares conocidos ha aumentado hasta superar el número de 500. Algunos se han detectado en la Gran Nube de Magallanes. Llama la atención el hecho de que muchos de los pulsares recién descubiertos presentan períodos cortos. En noviembre de 1992, los radioastrónomos que trabajaban con el radiotelescopio de Arecibo descubrieron ya un objeto que emite 642 pulsos por segundo. Si se transforman las señales en impulsos sonoros se oye un tono que se puede reproducir al piano. Este tono vendría a ampliar el símil que planteo en la página 198, donde explico a mis lectores qué sucedería si pudiésemos oír las ondas electromagnéticas procedentes del Universo. Esta estrella de neutrones, que posee posiblemente la misma masa que el Sol, o incluso un poco más, tiene que girar más de 600 veces por segundo alrededor de su eje para poder emitir señales con este ritmo. Se podría pensar que una estrella que rotase con esta rapidez se vería desgarrada por la fuerza centrífuga. Sin embargo, la fuerza de la gravedad en la superficie de una estrella de neutrones es tan sumamente grande que, incluso para una velocidad de rotación tan elevada, sólo se achata ligeramente.

Los pulsares son cada vez más lentos. Dentro de 75.000 años, el pulsar de la Nebulosa del Cangrejo emitirá únicamente 15 pulsos por segundo, y no los 30 que emite en la actualidad. ¿Significa esto que el pulsar de milisegundos, como se denomina a los pulsares que emiten cientos de pulsos por segundo, es todavía joven? No, ya que se han descubierto muchos pulsares de milisegundos en cúmulos globulares, que sabemos que son viejos, la mayoría de ellos con antigüedades superiores a los 10.000 millones de años. Las estrellas de gran masa, que explotan como supernovas, tienen que haber dejado atrás a sus pulsares hace miles de millones de años. ¿De dónde proceden estos pulsares en rápida rotación? ¿Existe un mecanismo que permita poner nuevamente en marcha a los pulsares lentos y viejos?

Si, por ejemplo, un pulsar perteneciente a un sistema estelar doble podría pasar materia desde la compañera a la estrella de neutrones, de manera semejante al flujo de materia recogido en la figura 9-8. La materia volvería a poner en marcha a la estrella sobre la que cae. De hecho se han observado pulsares que presentan el mismo efecto mostrado en la figura 10-4 y explicado en la figura 10-5 para el caso de una estrella de rayos X. Es seguro que estos pulsares forman parte de un sistema doble. Existe incluso un pulsar que desaparece con regularidad detrás de su compañera, a intervalos de 9 horas y 10 minutos y durante períodos de 44 minutos.

Desde la primera edición de este libro, muchos radioastrónomos han buscado señales procedentes de civilizaciones extraterrestres. Hasta ahora sus esfuerzos no se han visto coronados con el éxito. Entre tanto se han aprendido más cosas acerca de la formación de sistemas planetarios en el entorno de otras estrellas. El satélite IRAS, proyecto de cooperación entre los Estados Unidos de Norteamérica y los Países Bajos, exploró el cielo en la banda de la radiación infrarroja y descubrió un disco de polvo que emite radiación térmica alrededor de la estrella Beta Pictoris. Ha sido posible obtener imágenes de este disco, incluso desde la superficie terrestre. IRAS ha descubierto varios objetos de este tipo, en los cuales un disco de polvo rodea una estrella. ¿Estamos asistiendo al nacimiento de un sistema planetario?

El 12 de octubre de 1992, la NASA puso en marcha un programa de búsqueda de grandes dimensiones, para el que se han presupuestado cien millones de dólares durante los próximos seis años. Varios grandes radiotelescopios, entre ellos el de Arecibo, rastrean en la actualidad el cielo en busca de radiaciones extraterrestres. Se anali-

zan 10 millones de frecuencias por segundo, mientras que un gran computador comprueba si la radiación captada es de origen natural o presenta alguna semejanza con una señal portadora de informaciones adicionales. Se quieren explorar las estrellas, una a una, con la ayuda de las antenas, y observar regularmente 800 estrellas semejantes al Sol.

No creo que se vaya a encontrar nada. Inconscientemente recuerdo las palabras del senador de los EE.UU. que afirmó a este respecto: «En lugar de gastar fondos en buscar inteligencias extraterrestres sería mejor buscar personas inteligentes aquí, en Washington.»

Gotinga, abril de 1993







¿Durante cuánto tiempo podremos seguir viviendo a expensas del Sol? ¿De dónde proviene su energía? ¿Cómo se originan las estrellas y cómo acaban? ¿Quién decide la formación de las estrellas? ¿Qué es una supernova? ¿Qué son las estrellas de rayos X? El astrofísico Rudolf Kippenhahn responde en este libro a todas estas preguntas desde su propia experiencia en el campo de la investigación. Además, describe de modo ameno y comprensible todo lo que hoy sabemos sobre el ciclo vital de una estrella, en especial cómo cambian las estrellas al agotarse su energía.

El doctor Rudolf Kippenhahn fue profesor de Astronomía y Astrofísica en la Universidad de Gotinga de 1965 a 1974. En 1975 fue nombrado director del Instituto de Astrofísica de la Max-Planck-Gesellschaft, en Garching (Munich). Es coautor del libro de texto *Elementare Plasmaphysik* (*Física elemental del plasma*) y autor, entre otros, del libro *Licht vom Rande der Welt* (*Luz del confín del Universo*), publicado en la Biblioteca Científica Salvat.

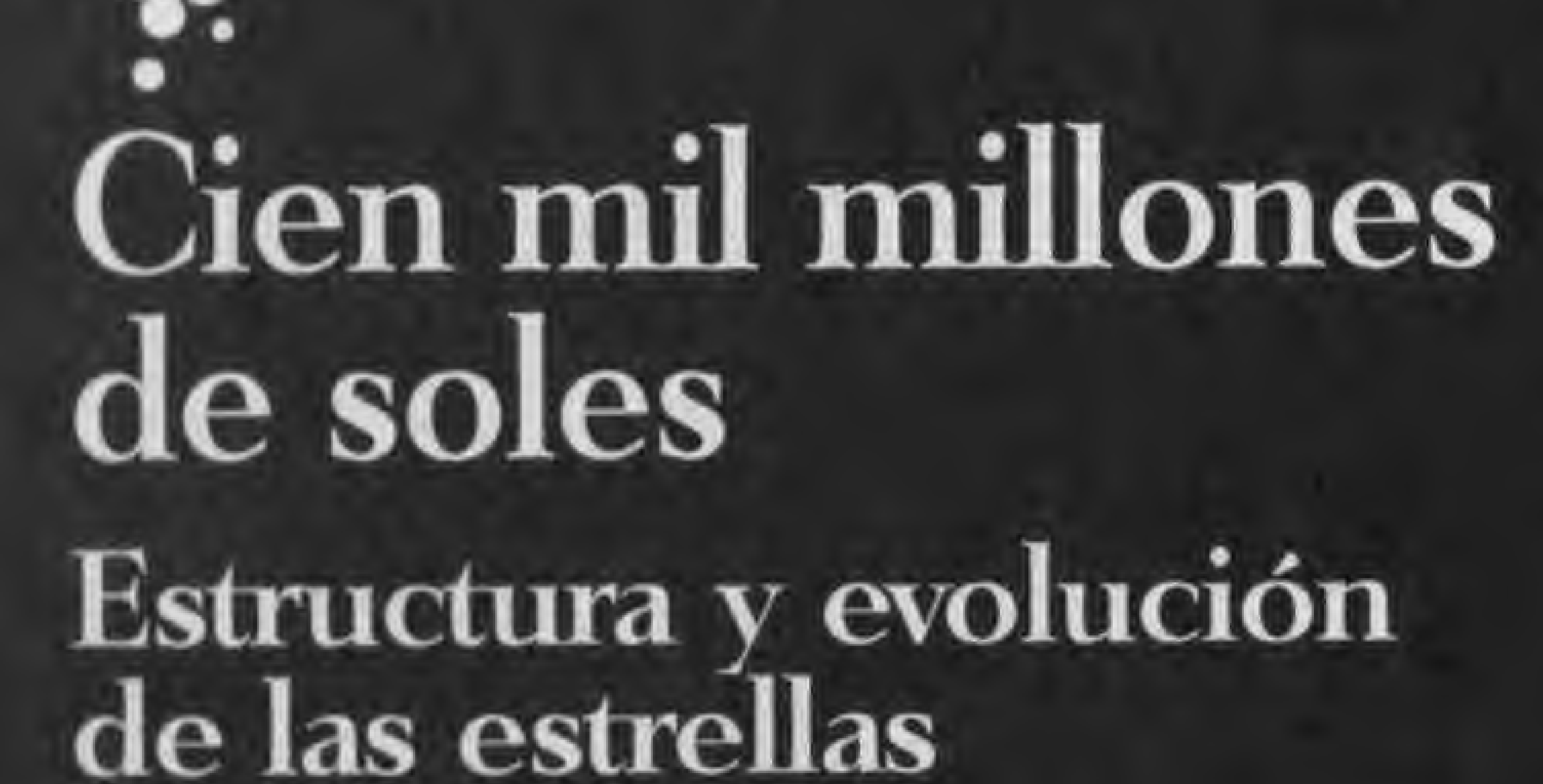



Cien mil millones de soles

R. Kippenhahn

21





Cien mil millones de soles

Estructura y evolución de las estrellas

Rudolf Kippenhahn

Biblioteca Científica Salvat

¿Durante cuánto tiempo podremos seguir viviendo a expensas del Sol? ¿De dónde proviene su energía? ¿Cómo se originan las estrellas y cómo acaban? ¿Quién decide la formación de las estrellas? ¿Qué es una supernova? ¿Qué son las estrellas de rayos X? El astrofísico Rudolf Kippenhahn responde en este libro a todas estas preguntas desde su propia experiencia en el campo de la investigación. Además, describe de modo ameno y comprensible todo lo que hoy sabemos sobre el ciclo vital de una estrella, en especial cómo cambian las estrellas al agotarse su energía.

El doctor Rudolf Kippenhahn fue profesor de Astronomía y Astrofísica en la Universidad de Gotinga de 1965 a 1974. En 1975 fue nombrado director del Instituto de Astrofísica de la Max-Planck-Gesellschaft, en Garching (Munich). Es coautor del libro de texto *Elementare Plasmaphysik* (*Física elemental del plasma*) y autor, entre otros, del libro *Licht vom Rande der Welt* (*Luz del confín del Universo*), publicado en la Biblioteca Científica Salvat.





Cien mil millones de soles

Estructura y evolución de las estrellas

Rudolf Kippenhahn

Biblioteca Científica Salvat